

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AS QUESTÕES AMBIENTAIS E O PROCESSO DE FRESAMENTO EM
ALTA VELOCIDADE DE MADEIRAS DE FLORESTA PLANTADA
EUCALYPTUS GRANDIS E EUCALYPTUS DUNNII**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MARZELY GORGES FARIAS

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 2000

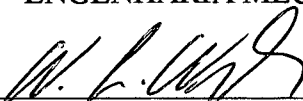
**AS QUESTÕES AMBIENTAIS E O PROCESSO DE FRESAMENTO EM ALTA
VELOCIDADE DE MADEIRAS DE FLORESTA PLANTADA EUCALYPTUS
GRANDIS E EUCALYPTUS DUNNII**

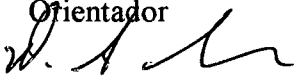
MARZELY GORGES FARIAS

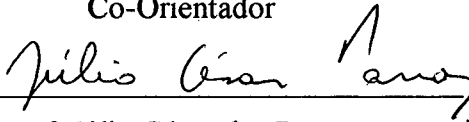
ESTA TESE FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOUTOR EM ENGENHARIA


ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.
Orientador

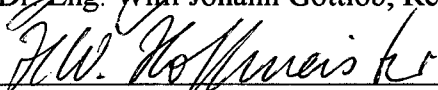

Prof. Engelbert Westkämper, Dr.-Ing. Dr.h.c
Co-Orientador


Prof. Júlio César dos Passos
Coordenador

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, Presidente


Prof. Dr. Eng. Willi Johann Gottlob, Relator


Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Hoffmeister


Prof. Dr. Ing. Carlos Alberto Szücs


Prof. Dr. Eng. Sandra Sulamita Nahas Baasch

Á DEUS

que se faz presente nos momentos especiais de
uma existência e através do tempo possibilita a
compreensão da magia de bem viver!

Oferecimento

À ZELINDRO ISMAEL FARIAS, marido e amigo, pelo amor, pelo incentivo, pela cobrança sincera e pela presença e colaboração constante e intensa nestes 16 anos de convivência

À papai MODESTINO GORGES e á mamãe ENI BERNADETE SCHMITT GORGES, pela vida e pela educação familiar de forma competente

Aos meus irmãos ANGÉLICA, AMILTON e REGINA pela convivência alegre e saudável nestes longos anos

À WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER, orientador e amigo, por suas contribuições, críticas e incentivo ao trabalho e na continuidade de meu aperfeiçoamento profissional e pessoal.

Agradecimento

Ao Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, orientador e amigo, sempre disposto a auxiliar e a incentivar o trabalho com seu conhecimento e experiência. Ouvinte atento, jamais deixou uma questão sem resposta e jamais deixou uma inquietação sem um conselho pertinente.

Ao Prof. Engelbert Westkämper por permitir a realização da parte experimental no Instituto de Máquinas-Ferramentas e Processos de Fabricação da Universidade Técnica de Braunschweig IWF/TU-BS e aceitar a co-orientação deste trabalho.

Ao Prof. Dr-Ing. Hans-Werner Hoffmeister, Diretor do IWF/TU-BS e amigo por contribuir de forma eficiente e eficaz na realização deste trabalho.

Ao relator Prof. Willi Johan Gottlob pela contribuição e pelo incentivo a continuidade do trabalho e a formação do “Grupo interinstitucional da madeira”, registrado no CNPq.

Aos membros da Banca examinadora pela contribuição em melhorar ainda mais o trabalho.

À Zelindro Ismael Farias, pela idéia na escolha do tema de Doutorado, que possibilitou a descoberta do amor pela minha profissão e a oportunidade concreta de contribuir para uma sociedade mais capacitada nas questões ambientais através da otimização dos processos industriais.

Aos Engenheiros e amigos sinceros do setor de Tecnologia de usinagem de madeira do IWF/TU-BS Dr.-Ing. Markus Sachers, Thorsten Schnettker, Jörn Blecken, Dr.-Ing. Olaf Schadoffsky, Dr.-Ing. Adrian Riegel, Till Grubler, Thorsten Wietfeld e Bernd Lemke pela apoio inestimável e sem restrições, e sempre com opiniões lúcidas e pertinentes.

Aos Técnicos e amigos do IWF/TU-BS H. Link, H.-J. Jaetsch, T. Rörmann, Eng. S. Ilensser, D. Sächting, Gersdorf, J. Mäuser e Eng. A. Pahlitzsch pelo suporte técnico e logístico na realização dos ensaios.

À eficiente e atenciosa equipe administrativa do IWF/TU-BS, S. Reiniecke e B. Klages.

Aos Engenheiros amigos Claus Schwärzel, Carlos Cezar Bier, Dr. Antônio Salvador da Rocha, Andreas Wenda, as amigas Bióloga Dra. Florence Garnier e a

Agradecimento

médica Steffi Schwärzel pelo incentivo e contribuição no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

À CAPES, DAAD e UNOESC pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de doutorado e pelo apoio logístico.

À Empresa KLABIN Florestal, em especial à Diretoria da Empresa e ao Eng. Valmir Calori e a Empresa EMBRAPA – Setor de Florestas, em especial ao Eng. Erich Schaitza, pela doação das madeiras necessárias a realização deste trabalho de pesquisa, pelo apoio inestimável e pelas discussões sempre tão pertinentes.

À UNIVILLE – Universidade da Região de Joinville por criar condições para dar continuidade ao trabalho.

Aos colegas do LMP/UFSC- Florianópolis e do IWF/ TU-Braunschweig pelo apoio.

Aos parentes e amigos, brasileiros e alemães, que carinhosamente compreenderam a minha ausência e me apoiaram de forma incondicional na realização deste trabalho e no meu progresso profissional e pessoal.

À todos aqueles que de maneira direta ou indireta tornaram possível a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Sumário.....	vii
Lista de figuras e de tabelas.....	xi
Simbologia.....	xv
Resumo.....	xxi
Abstract.....	xxii
Zusammenfassung.....	xxv
Biografia.....	xxvii
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte.....	8
2.1 O Fresamento em altas Velocidades de Madeiras Maciças e de Compósitos de Madeira.....	8
2.2. Máquina-Ferramenta	12
2.2.1. Base, Componentes Construtivos da Base e das Guias das Máquinas-Ferramentas.....	14
2.2.2. Sistema de Controle (Controle e Acionamento)	16
2.2.3. Acionamento Principal	17
2.2.4. Sistema de Fixação da Ferramenta	18

2.2.5. Sistema de Fixação da Peça	19
2.3. Ferramenta	20
2.3.1. Aspectos Gerais	20
2.3.2. Concepção das Ferramentas de Corte	21
2.3.3. Geometria da Ferramenta	22
2.3.4. Materiais para Ferramenta de Corte	24
2.4. Caracterização da Madeira para Fins Industriais	29
2.4.1. Generalidades	29
2.4.2. Estrutura Submicroscópica	32
2.4.3. Estrutura Macroscópica	36
2.4.4. Propriedades Organolépticas da Madeira	38
2.4.5. Composição Química	39
2.4.6. Defeitos Anatômicos	41
2.4.7. Preparação da Madeira para Uso Industrial e Investigações tecnológicas	42
2.4.8. Procedências das Espécies Florestais Estudadas	46
2.4.9. Influência da Espécie de Madeira sobre os Critérios de Usinabilidade	47
2.5. Grandezas de Entrada	52
2.6. Grandezas de Processo	58
2.6.1. Forças e Potência de Usinagem	58
2.6.2. Desgaste da ferramenta	62
2.7. Grandezas de Saída	63
2.7.1. Textura Superficial	65
2.7.2. Integridade Superficial	74

3. Objetivos do Trabalho	76
4. Planejamento Experimental	82
4.1. Máquina-Ferramenta	85
4.2. Ferramenta	86
4.3. Corpos de prova	87
4.4. Sistemas de Medição	88
4.4.1. Medição das Forças de Usinagem	88
4.4.2. Investigação da Curva de Vida da Ferramenta	93
4.4.3. Avaliação da Textura superficial	95
5. Análise dos Resultados	101
5.1. Influências sobre as Forças de Usinagem	101
5.1.1. Influência da Umidade	102
5.1.2. Influência do avanço	103
5.1.3. Determinação da força específica segundo Kienzle	110
5.2. Influência sobre a textura superficial	118
5.3. Análise sobre a vida da ferramenta	124
6. Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos	136
6.1. Conclusões	136
6.2. Propostas de continuidade da Pesquisa na área de Tecnologia de Usinagem de Madeiras alternativas	141
7. Referências Bibliográficas.....	144

ANEXOS

ANEXO A	158
A. Caracterização, Histórico e Tendências do Setor Florestal	158
A.1 A Humanidade e as Questões Ambientais	158
A.2. A Humanidade e a Madeira	164
A.3. Significância Econômica da Madeira	165
A.4. Tipos de Silvicultura	167
A.5. O Desenvolvimento da Indústria Madeireira no Brasil	173
A.6. O Desenvolvimento Madeireiro em Santa Catarina	176
A.7. Consumo Atual de Madeira	179
A.8. Necessidade da Formação de Cooperativas	181
A.9. O Problema da Madeira como Material para Produtos Industrializados	182
ANEXO B	184
B. Caracterização, Histórico e Tendências do Setor Moveleiro	184
B.1. Apresentação	184
B.2. Economia Globalizada	185
B.3. Visão sistêmica da Competitividade	186
B.4. Mecanismos para o aumento da Capacidade Competitiva	189
B.5. O Mercado Internacional de Móveis	191
B.6. Padrão de Competitividade Internacional	193
B.7. A indústria Moveleira Brasileira	195
B.8. A Indústria Catarinense de Móveis e o Pólo Moveleiro de São Bento do Sul	197

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de perfis fresados de madeiras maciças e de seus compostos na indústria moveleira e de artigos de madeira.....	9
Figura 2 – Fatores de influência sobre o acabamento superficial no fresamento de madeiras maciças e de seus compostos.....	12
Figura 3 – Elementos geométricos de uma fresa.....	23
Figura 4 – Estrutura microscópica das gimnospermas.....	33
Figura 5 – Estrutura microscópica das angiospermas dicotiledôneas.....	34
Figura 6 – Estrutura macroscópica da madeira.....	37
Figura 7 – Sentidos relativos de corte para madeira.....	50
Figura 8 – Principais grandezas no processo de fresamento.....	54
Figura 9 – Influência do avanço no fresamento de madeiras maciças.....	57
Figura 10 – A força de usinagem e suas componentes.....	60
Figura 11 – Grandezas significativas do desgaste da ferramenta no fresamento de madeiras maciças e de seus compostos.....	63
Figura 12 – Desvios de forma do perfil de uma superfície (DIN4760).....	57
Figura 13 – Estrutura microscópica para diferentes tipos de madeira).....	70
Figura 14 – Rugosidade superficial R_z para diferentes espécies de madeira sob os mesmos parâmetros de usinagem.....	73
Figura 15 – Fresadora CNC de topo Reichenbacher modelo Ranc 740 H.....	86
Figura 16 – Fresa de topo para fresamento em altas velocidades.....	86
Figura 17 – Configuração do sistema para medição de forças no fresamento em altas velocidade de madeiras.....	90
Figura 18 – Medição do desgaste da ferramenta (deslocamento do gume em relação a face SV_γ) por meio de uma sonda com apalpador mecânico.....	93

Figura 19 – Determinação da marca de desgaste e da largura da marca de desgaste VB para a ferramenta de metal duro por meio de um processo de impressão da gume da ferramenta.....	94
Figura 20 – Medição da textura superficial por meio de uma sonda com apalpador mecânico.	95
Figura 21 – Correção 3D dos valores de rugosidade medidos.	98
Figura 22 – Identificação das características superficiais da madeira por meio da análise da imagem	99
Figura 23 – Perfil de rugosidade de madeira maciça.	99
Figura 24 – Influência da umidade sobre a força de corte máxima para a espécie <i>E. dunnii</i>	103
Figura 25 – Influência do avanço por dente sobre a força média de avanço para as espécies <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Eucalyptus dunnii</i> e Rotbuche.....	105
Figura 26 – Influência do avanço por dente sobre a força média de corte para as espécies <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Fagus Sylvática</i> (Rotbuche).....	106
Figura 27 – Construção macroscópica da espécie <i>Eucalyptus grandis</i>	107
Figura 28 – Construção macroscópica da espécie <i>Eucalyptus dunnii</i>	108
Figura 29 – Construção macroscópica da espécie <i>Fagus silvática</i>	109
Figura 30 – Influência do avanço por dente sobre a força ativa para <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Eucalyptus dunnii</i> e <i>Fagus Sylvática</i> (Rotbuche).....	110
Figura 31 – Força de corte específica em dependência da máxima espessura de usinagem para <i>Eucalyptus grandis</i> .).....	112
Figura 32 –Tendência da reta inclusive a equação da reta para a força de corte específica.....	113
Figura 33 –Força específica de corte em dependência da espessura de usinagem.....	114
Figura 34 – Força específica de corte /largura de usinagem em dependência da espessura de usinagem máxima para <i>Fagus Sylvática</i> (Rotbuche), <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	116

Figura 35 – Força específica de corte em dependência da espessura de usinagem máxima para <i>Fagus Sylvática</i> (Rotbuche), <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	118
Figura 36 – Rugosidade de diferentes tipos de madeira para o processo de fresamento periférico medido no sentido transversal da fibra.....	120
Figura 37 – Influência de diferentes avanços por dente sobre Rugosidade.....	121
Figura 38 – <i>Eucalyptus grandis</i> em função do emprego de diferentes valores de avanço por dente.....	123
Figura 39 – Análise do desgaste da ferramenta no processo de fresamento conjugado de topo e periférico de Rotbuche, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	126
Figura 40 – Processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para a espécie Rotbuche.....	127
Figura 41 – Processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para a espécie <i>Eucalyptus grandis</i>	128
Figura 42 – Processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para a espécie <i>Eucalyptus dunnii</i>	129
Figura 43 – Força de corte máxima em correlação com o percurso de corte no processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para as espécies <i>Rotbuche</i> , <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	131
Figura 44 – Ensaio de desgaste da ferramenta na usinagem <i>Rotbuche</i> na direção tangencial longitudinal, microscopia eletrônica com ampliação de 350x.....	132
Figura 45 – Ensaio de desgaste da ferramenta na usinagem <i>Eucalyptus dunnii</i> na direção tangencial longitudinal, microscopia eletrônica com ampliação de 350x.....	133
Figura 46 – Ensaio de desgaste da ferramenta na usinagem <i>Eucalyptus grandis</i> na direção tangencial longitudinal, microscopia eletrônica com ampliação de 350x.....	134
Figura 47 – Análise da textura superficial correlacionada ao percurso de corte no processo de fresamento conjugado das espécies de <i>Rotbuche</i> , <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	135
Figura 48 – Níveis determinantes da competitividade sistêmica.....	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Valores de retração e inchamento para diferentes espécies	44
Tabela 2: Descrição dos parâmetros de usinagem.....	80
Tabela 3: Valores da força de corte para o fresamento de Rotbuche, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus dunnii</i>	115
Tabela 4: Valores principais da força específica de corte e os respectivos expoentes da equação de Kienzle	80
Tabela 5: Comércio internacional de móveis: valor das importações segundo principais países importadores.....	191

Simbolos Gregos

Símbolo	Unidade	Denominação
α	°	Ângulo de incidência da ferramenta [Freiwinkel (<i>Tool orthogonal clearance</i>)]
α_0	°	Ângulo de incidência ortogonal da ferramenta [Freiwinkel der Werkzeugorthogonalebene]
α_n	°	Ângulo de incidência no plano secundário da ferramenta [Nebenfreiwinkel der Werkzeugschneidenebene]
α	°	Ângulo de perfil [Profilöffnungswinkel]
β	°	Ângulo de cunha da ferramenta [Keilwinkel (<i>Orthogonal wedge angle</i>)]
β_0	°	Ângulo ortogonal de cunha da ferramenta [Keilwinkel der Werkzeugorthogonalebene]
λ	°	Ângulo de inclinação do gume principal da ferramenta [Neigungswinkel der Hauptschneide, Achswinkel (<i>Cutting edge inclination</i>)]
λ	mm	Comprimento de desvio de forma
λ_c	mm	Comprimento de onda limite (cut-off)
λ_B	μm	Comprimento médio de onda de rugosidade
λ_q	μm	Comprimento médio quadrático de onda da rugosidade
λ'	°	Ângulo de inclinação no eixo da ferramenta [Induzierter Achswinkel]
κ_r	°	Ângulo de direção do gume da ferramenta [Einstellwinkel (<i>Cutting edge angle</i>)]
γ	°	Ângulo de saída da ferramenta [Spanwinkel (<i>Orthogonal rake</i>)]
γ_0	°	Ângulo de saída ortogonal da ferramenta [Spanwinkel der Werkzeugorthogonalebene]

γ	°	Ângulo de ponta do apalpador [Spitzenwinkel des Tasters]
γ	°	Ângulo de saída
ρ	kg/m ³	Densidade [Dichte]
φ_1	°	Ângulo de entrada da ferramenta [Eintrittswinkel]
φ_2	°	Ângulo de saída [Austrittswinkel]
σ_B	N/mm ²	Resistência a flexão [Biegefestigkeit]
σ_D	N/mm ²	Resistência a compressão [Druckfestigkeit]
ϕ_e	°	Ângulo de ataque [Eingriffswinkel]
ϕ_e	°	Ângulo de ataque Eingriffswinkel

Simbolos Romanos

Símbolo	Unidade	Denominação
1- m_c		Parâmetros referentes ao processo de usinagem (condições de usinagem e geometria da ferramenta.
A_D	mm ²	Seção transversal de usinagem [Spanungsquerschnitt]
a_e	mm	Penetração de trabalho (largura de engajamento) [Eingriffmaß; Schnittdicke (<i>Working engagement of the cutting edge</i>)]
a_p	mm	Profundidade de corte [Schnitttiefe (<i>back engagement of the cutting edge</i>)]
A_Z	mm ²	Seção transversal do cavaco [Spanungsquerschnitt an der Schneide]
b	mm	Largura de usinagem [Spanungsbreite]
d		Fator de forma [Formfaktor]
d	mm	Diâmetro da ferramenta [Werkzeugdurchmesser (<i>Tool diameter</i>)]
D	mm	Diâmetro da ferramenta [Werkzeugdurchmesser]
E	N/mm ²	Módulo de elasticidade [Elastizitätsmodul]

f	μm	Erro de medição na medição da rugosidade devido ao raio da ponta do apalpador [Fehlbetrag bei der Oberflächenmessung durch Tastspitzenradius]
f	mm	Avanço [Vorschub]
f_0	Hz	Frequência limite superior [Obere Grenzfrequenz]
F_a	N	Força ativa [Aktivkraft]
f_a	s^{-1}	Frequência de amostragem [Abtastrate]
F_c	N	Força de corte [Schnittkraft]
F_{cn}	N	Força normal de corte [Schnittnormalkraft]
f_e	s^{-1}	Frequência de corte [Eingriffsfrequenz der Schneide]
f_f		Fator de forma [formfaktor]
F_f	N	Força de avanço [Vorschubkraft]
F_{fn}	N	Força normal de avanço [Vorschubnormalkraft]
F_n	N	Força normal [Normalkraft]
F_p	N	Força passiva [Passivkraft (senkrecht auf die bearbeitete Fläche)]
F_t	N	Força de contato do apalpador [Tastkraft]
f_u	Hz	Frequência para um limite inferior [untere Grenzfrequenz]
f_z	mm	Força de avanço por dente [Zahnvorschub (<i>Feed rate</i>)]
f_z	mm	Força de avanço por dente por rotação [Zahnvorschub pro Umdrehung]
h_{max}	mm	Máxima espessura de corte [maximale Spanungsdicke]
K	$^\circ$	Grau de interação[Völligkeitsgrad]
k_c	N/mm^2	Força específica de corte [spezifische Schnittkraft]
$K_{c1,1}$		Constante específica do material (parâmetros característicos referentes ao material da peça: teor de umidade e a densidade para a direção de corte paralela às fibras).
$k_{c1,1}$	N/mm^2	Força específica de corte para $1 \times 1 \text{ mm}^2$ [Hauptwert der spezifischen Schnittkraft]
l_c	μm	Comprimento limite de onda [Grenzwellenlänge]

l_c	mm	Percurso de usinagem [Schnittweg]
l_{ctot}	m	Percurso de usinagem total [Gesamt-Schnittweg]
l_f	mm	Percurso de avanço [Vorschubweg]
l_m	mm	Percurso de medição [Meßstrecke]
L_{PR}	mm	Comprimento do perfil [Profillänge]
l_t	mm	Percurso de medição na direção X [Taststrecke in x-Richtung]
l_y	mm	Percurso de medição na direção Y [Taststrecke in y-Richtung]
m_c		Coefficiente angular da reta para determinação da força específica [Anstiegswert]
M_r, t_p	%	Parcela percentual de suporte de material [Materialtraganteil]
M_{r1}	%	Menor parcela percentual de suporte da região central [Kleinster Materialanteil des Rauheitskernprofils]
M_{r2}	%	Maior parcela percentual de suporte na região central [Größter Materialanteil des Rauheitskernprofils]
n		Número de segmentos [Anzahl der Segmente]
n	1/min	Rotação da ferramenta [Werkzeugdrehzahl (<i>Tool rotation rate</i>)]
n	min^{-1}	Rotação [Drehzahl]
O	mm^2	Superfície de corte [Schnittoberfläche]
O_{sp}	mm^2	Superfície específica [spezifische Oberfläche]
$P_{bez.}$	W	Potência de corte específica [Bezogene Schnittleistung]
P_c	W	Potência de corte [Schnittleistung]
P_s	W	Potência de corte [Scheinleistung]
P_t	μm	Profundidade do perfil [Profiltiefe]
Q	mm^3/s	Volume usinado na unidade de tempo [Zeitspanvolumen]
$r(\zeta)$	mm	Raio do gume [Schneidenradius]
r_0	mm	Raio do gume [Schneidkantenradius]

R_1	N	Força de atrito [Reibkraft]
R_2	N	Força de separação [Trennkraft]
R_3	N	Força de deformação [Deformationskraft]
R_a	μm	Rugosidade média aritmética [Mittenrauwert]
R_k	μm	Profundidade de rugosidade central [Kernrauhtiefe]
R_{max}	μm	Rugosidade máxima [Maximale Rautiefe]
R_p, R_m, R_y	μm	Profundidade de alisamento [Glättungstiefe]
R_{pk}	μm	Altura reduzida dos picos [Reduzierte Spitzenhöhe]
r_t	mm	Raio da ponta do apalpador [Tastspitzenradius]
R_{vk}	μm	Profundidade reduzida dos vales [Reduzierte (Riefen-) Spitzentiefe]
R_z	μm	Rugosidade média [Gemittelte Rautiefe]
$R_{z\text{ISO}}$	μm	Rugosidade média baseada em 10 pontos [Zehnpunkthöhe]
S_{AR}	mm^2/m	Desgaste dos gumes [Kantenschartigkeit]
S_B	mm	Comprimento da curvatura do cavaco [Spanbogenlänge]
SV	μm	Deslocamento do gume em relação a face [Schneidkantenversatz]
SV_γ	μm	Desgaste do gume da ferramenta [Schneidenverschleiß]
$t_{\phi e}$	ms	Intervalo de contato de um gume na peça [Eingriffszeit einer Schneide]
t_a	min	Tempo de aproximação e afastamento da peça ou ferramenta
t_c	min	Tempo de corte
t_s	min	Tempo de substituição da peça
t_u	μm	Profundidade de ondulação na peça (Messerschlagtiefe)
u	%	Teor de umidade [Feuchtegehalt]
V	mm^3	Volume usinado [Spanvolumen]
VB		Área de medição vertical [Vertikaler Meßbereich]
VB	μm	Largura da marca de desgaste no gume da ferramenta [Verschleißmarkenbreite]

v_c	m/s	Velocidade de corte [Schnittgeschwindigkeit (<i>Cutting speed</i>)]
v_f	m/min	Velocidade de avanço [Vorschubgeschwindigkeit (<i>Feed speed</i>)]
w_0	μm	Profundidade de penetração do apalpador na peça [Eindringtiefe des Tasters in das Werkstück]
W_t	μm	Profundidade máxima de Ondulação [Wellentiefe]
X		Fator de correção [Korrekturfaktor]
z		Número de dentes [Zähnezahl (<i>Number of knives</i>)]

RESUMO

As mudanças de comportamento quanto aos aspectos ambientais promovem uma reestruturação no mercado internacional de matéria-prima de produtos florestais, conquistando a madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* oriunda de "Floresta Plantada" seu "nicho" no segmento moveleiro. Por ser renovável tem importância ascendente num mercado internacional, onde além das pressões ecológicas, também a necessidade de redução de custos e a manutenção da competitividade são vitais.

Este trabalho tem como objetivo fornecer dados comparativos das características de usinabilidade de madeiras alternativas para a indústria moveleira do Brasil, bem como da Alemanha. Os dados obtidos neste estudo serão transferidos para a indústria fabricante de máquinas ferramentas, bem como para os usuários destas, além de contribuir para o aumento da utilização destas espécies pelo setor moveleiro.

As seguintes propriedades foram determinadas para as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*: o desgaste do gume da ferramenta (especialmente a progressão do desgaste), a força de usinagem e a qualidade das superfícies produzidas. A madeira de Rotbuche da Família *Fagus Silvática* é usada como o material de referência, por ser um tipo representativo de espécie européia de madeiras duras.

Os ensaios foram realizados para o processo de fresamento combinado de topo e periférico para o fresamento de uma ranhura em um elemento de madeira em uma fresadora comercial CNC de topo da firma Reichenbacher modelo Ranc 740 H. Como ferramenta foi utilizada uma fresa com dois insertos, (Fa. Leuco), apropriadas para o fresamento de ranhuras em madeira maciça em fresadoras CNC. A ferramenta tem um diâmetro de 80 mm projetado para uma rotação máxima de $n_{\max} = 18.000 \text{ 1/min}$ ($v_{\max} = 75 \text{ m/s}$). A ferramenta selecionada foi de metal duro (HM HL Board 05 da Fa. Leuco) – material de ferramenta internacionalmente utilizado pelo segmento moveleiro.

Para a análise da influência da umidade sobre as forças de corte foi realizada investigação com a espécie *E. dunnii*. A dependência investigada mostra, que as forças permanecem constantes tanto na faixa de umidade de até cerca de 20% como também acima de cerca de 40%. Já na faixa de 20% a 40% de umidade ocorre um leve aumento das forças de corte em até 10%. Desta forma, conclui-se que pode-se fazer uma análise comparativa direta das forças de corte para os três tipos de madeiras, pois foram usinadas com teor de umidade padrão de 12% .

Com o aumento do avanço pode ser verificado para todas as madeiras analisadas uma dependência linear (levemente degressiva) no aumento das forças de avanço. O Aumento das forças de avanço são mais acentuadas para o *E. dunnii* do que para o *E. grandis* e *Rotbuche*. Para o *Rotbuche* verificou-se menores forças de avanço apesar de apresentar maior densidade, que pode ser esclarecido pelas relativas fases curtas de sua estrutura anatômica e com isso menores forças internas de ligação.

Através das forças de corte investigadas foram determinadas os valores principais para força de corte segundo Kienzle ($k_{c1.1}$). Com $k_{c1.1}=19,66$ N/mm está o *E. dunnii* claramente acima do *E. grandis* ($k_{c1.1}=16,93$ N/mm) e *Rotbuche* ($k_{c1.1}=16,15$ N/mm). Isto já era esperado de acordo com os resultados obtidos para as forças de avanço.

A influência do avanço sobre a rugosidade da ranhura fresada das madeiras mostra que até aproximadamente $f_z = 1,5$ mm não ocorre nenhuma variação dos valores R_z e R_{pk} . Somente para $f_z = 2$ mm aumentam visivelmente os valores de rugosidade, o que gera uma correspondente piora da qualidade superficial. Pode-se ainda observar que para a madeira de *E. grandis*, os valores de rugosidade para a faixa de $f_z = 2$ apresentam valores excelentes. Isto devido ao maior número de poros presentes na estrutura anatômica quando comparado com as outras duas madeiras. Implica em vantagem econômica em se fresar a madeira de *E. grandis* com maiores velocidades de avanço.

Os ensaios de vida realizados para um percurso de corte de 40 km (29 x percurso de avanço) produziram uma piora mínima da qualidade superficial e um aumento muito pequeno das forças de corte. Isto é esclarecido com o também pequeno desgaste do gume da ferramenta: o deslocamento do gume S_{vy} final determinado para o *E. dunnii* foi de $8,5 \mu\text{m}$ e para o *E. grandis* de $10 \mu\text{m}$. Para o *Rotbuche* nenhum deslocamento do gume foi identificado pela agulha do apalpador, somente a análise microscópica da impressão do gume da ferramenta mostra um leve arredondamento do gume. Disso confirma-se, que o gume após 40 km de percurso de corte se encontra ainda afiado. O comportamento da madeira de Eucalipto se mostra mais abrasivo que a de *Rotbuche*.

ABSTRACT

The environmental awareness in the industrial as well as in developing countries changed in a sustainable way during the past years. Trends show clearly the increasing interest in regenerating raw materials. Consequently there is a growing demand on wood and massive wood products. In the near future plantation wood like eucalyptus grandis and eucalyptus dunnii will substitute the classic tropical wood. Further factors in favour for the use of planted instead of tropical wood are also less total costs for logging and transport.

Nowadays the knowledge on cutting properties and special characteristics of Eucalyptus is not comprehensive, that means a substantial research potential is still existing.

In order to promote the acceptance of Eucalyptus species, milling process properties had to be examined. Following properties were determined: tool wear (especially the wear progress), the cutting forces and the quality of produced surfaces. Red beech wood is used as a reference material, which is a representative type of European hardwood species. Obtained results should serve the Brazilian and German furniture industry as basic information on processing the examined wood species.

The machining test were performed with a commercial NC-router, brand Reichenbacher RANC 740H.

An one-edge end mill cutter equipped with indexable inserts made of cemented carbide (ISO K05) was used as tool. The cutting forces, the quality of the work piece surfaces (roughness) and the wear of the cutting edges were measured.

With increasing feed per tooth an approximately linear (slightly degressive) increase of the feed force was obvious at all materials. The feed forces increased faster at eucalyptus grandis than at red beech. The fact that despite of a higher density, less feed forces occur during the machining of red beech, can be explained by the relatively short fibrous structure of red beech and therefore less internal binding forces are acting.

The influence of the feed per tooth on the surface roughness of the materials had shown that until approx. $f_z = 1,5$ mm no visible change of the parameters R_z and R_{pk} occurred. Not until $f_z = 2$ mm the values increased considerably and thus an inferior surface quality resulted.

Up to a feed travel of 1400 m the performed tool life tests resulted in a minimum deterioration of the surface quality and a very slight increase of the cutting forces. This fact is also explainable by a slight wear at the cutting edges: the displacement of the cutting edge SV_λ resulted at test end 10 μm for *E. grandis*, and 8 μm for *E. dunnii*. Contact stylus instruments showed no displacements at red beech however, microscopic images of edge marks show slightly rounded cutting edges. Thus it can be concluded that the edge life is within a perfect work range up to 1400 m feed travel. The higher edge wear of eucalyptus wood compared to the more dense one of red beech resulted from more silicate in eucalyptus wood.

In the past the Brazilian wood research was mainly limited to the field forestry botany. After a lot of success in the genetic improvement concerning the growth of plantation wood like eucalyptus, a holistic research approach includes also the utilization. Utilization is the foundation stone for further research which is focussed on the machinability of these wood species.

This contribution will explain the interaction between cultivated wood characteristics of eucalyptus and the necessary machining technology.

Zusammenfassung

Das Umweltbewußtsein in den Industrie- und Schwellenländern hat sich in den letzten Jahren nachhaltig geändert. Der Trend zeigt deutlich in Richtung nachwachsende Rohstoffe. Holz respektive Massivholzprodukte erfahren in diesem Zusammenhang eine stetig wachsende Nachfrage. In Zukunft ist damit zu rechnen, daß Plantagenholzer wie z.B. *Eukalyptus grandis* und *Eukalyptus dunnei* die klassischen Tropenhölzer substituieren. Weitere Faktoren, die für eine Verwendung von Plantagenholz anstelle von Tropenhölzern sprechen, liegen auch in den deutlich geringeren Gesamtkosten für Einschlag und Transport.

Über die Zerspanbarkeit und die spezifischen Eigenschaften von *Eukalyptus* liegen derzeit nur wenige Erkenntnisse vor. Hier besteht noch ein erhebliches Forschungspotential. Im Rahmen dieser Arbeit, die am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU-Braunschweig angefertigt wurde, wurde ein umfassendes Zerspanungsmodell für diesen Werkstoff entwickelt.

Ein weiteres, wesentliches Ziel dieser Arbeit bestand in der systematischen Aufarbeitung der in der deutschen Möbelindustrie eingesetzten Fertigungstechnik. Am Beispiel der in Deutschland häufig industriell verarbeiteten Holzart Rotbuche (*Fagus silvatica*) wurde der Stand der Technik aufbereitet. Da Rotbuche und *Eukalyptus* hinsichtlich der Zerspanung ähnliche Eigenschaften aufweisen, ist die einzusetzende Fertigungstechnik durchaus vergleichbar und erlaubt (in Grenzen) eine Analogiebildung für die brasilianische Möbelindustrie.

Die Zerspanversuche wurden auf einer handelsüblichen NC-Oberfräse, Typ Reichenbacher RANC 740H, durchgeführt. Als Werkzeug kam ein einschneidiger Schaftfräser zum Einsatz, der mit Wendeschneidplatten aus Hartmetall (ISO K05) bestückt wurde. Gemessen wurden die Schnittkräfte, die Qualität der Werkstückoberflächen (Rauheiten) sowie der Verschleiß der Schneiden.

Mit steigendem Zahnvorschub konnte eine annähernd lineare (leicht degressive) Steigerung der Vorschubkraft bei allen Werkstoffen festgestellt werden. Der Anstieg der Vorschubkraft verlief bei *E. dunnei* steiler als bei *E. grandis* und Rotbuche. Die

Tatsache, daß bei Rotbuche trotz der höheren Dichte die geringsten Vorschubkräfte auftreten, ist durch die relativ kurzfasrige Struktur von Rotbuche und die damit geringeren inneren Bindekräfte zu erklären.

Der Einfluß des Zahnvorschubes auf die Oberflächenrauheit der Werkstoffe ergab, daß bis etwa $f_z = 1,5$ mm keine erkennbare Veränderung der Kennwerte R_z und R_{pk} auftritt. Erst bei $f_z = 2$ mm steigen die Werte merklich an, so daß sich eine entsprechend verschlechterte Oberflächenqualität ergibt.

Die durchgeführten Standzeitversuche bis zu einem Vorschubweg von 1400 m ergaben eine minimale Verschlechterung der Oberflächenqualität und einen sehr geringen Anstieg der Schnittkräfte. Dies ist mit dem ebenso geringen Verschleiß der Schneiden zu erklären: Der Schneidenversatz SV_γ betrug bei Versuchsende für *E. grandis* 10 μ m und für *E. dunni* 8 μ m. Für Rotbuche war anhand der Tastschnitte kein Versatz erkennbar, erst Mikroskopaufnahmen von Schneidenabdrücken zeigten eine leichte Schneidkantenverrundung. Daraus ist zu schließen, daß sich die Schneiden bis 1400 m Vorschubweg noch im arbeitsscharfen Bereich befinden. Der höhere Schneidenverschleiß der Eukalyptushölzer im Vergleich zur dichteren Rotbuche erklärt sich dabei aus den höheren Silikatanteilen im Eukalyptus.

In der Vergangenheit beschränkte sich die Holzforschung in Brasilien im wesentlichen auf die Forstbotanik. Nachdem dort viele Erfolge bei der genetischen Verbesserung hinsichtlich Wachstum (geringere Umtriebszeit) und Wuchs (Geradschäftigkeit) von Plantagenhölzern wie Eukalyptus erzielt wurden, schließt ein ganzheitlicher Forschungsansatz auch deren Nutzbarmachung ein. Hierin liegt der Grundstein für weitere Forschungsarbeiten, wobei hier der Fokus auf der Zerspanbarkeit dieser Holzarten liegt.

Diese Arbeit soll zum Verständnis der Wirkzusammenhänge zwischen den angezüchteten Holzeigenschaften von Eukalyptus und der erforderlichen Zerspanungstechnologie beitragen.

BIOGRAFIA DA AUTORA

Marzely Gorges-Farias, Engenheira Mecânica e poetisa, nascida a 29 de novembro de 1964 na cidade de Antônio Carlos / Santa Catarina. Casada com o Ten. Zelindro Ismael Farias, oficial da Polícia Militar e do Corpo de Bombeiros do Estado de Santa Catarina. Coursou o primário e ginásio em São José/SC, curso técnico mecânico na Escola Técnica Federal de Santa Catarina em Florianópolis/SC, onde foi condecorada com a medalha de Honra ao mérito pelo primeiro lugar. Em 1983 obteve aprovação no concurso Vestibular da Universidade Federal de Santa Catarina, concluindo o curso de engenharia mecânica em segundo lugar na turma de julho de 1988. Em julho de 1987 tornou-se a primeira mulher a trabalhar na área operacional do Departamento de Manutenção da Empresa ELETROSUL. Foi engenheira mecânica do laboratório de mecânica de precisão LMP/UFSC. Orientada pelo Prof. Dr.-Ing. Walter L. Weingaertner iniciou o mestrado em 1989 no programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEMC/UFSC e o concluiu com êxito em maio de 1992 na área de processos de fabricação com o tema “Monitoramento de Processos de Fabricação”. Em função da necessidade de profissionais, implementou o primeiro curso de engenharia no Meio-Oeste e Oeste Catarinense em 1993 na Universidade do Oeste de Santa Catarina / UNOESC, sendo eleita a primeira Chefe de Departamento e reeleita por unanimidade. Concomitantemente foi professora do Departamento de Engenharia de Produção Mecânica, coordenadora local do curso de pós-graduação à nível de especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho em convênio com a Universidade Federal de Santa Catarina, membro do conselho universitário, membro do conselho de ensino, pesquisa e extensão e suplente na Assembléia Geral da Fundação UNOESC. Foi também a primeira-dama do Corpo de Bombeiros do meio Oeste Catarinense. Em outubro de 1994, foi pelo Ten. Zelindro Ismael Farias detectada a necessidade de engenheiros mecânicos com formação na área de “Tecnologia de Usinagem de Madeiras e de Compósitos” e, conseqüentemente, surge o tema de Doutorado. Em 1995 inicia o Doutorado na modalidade Sanduíche no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEMC/UFSC e no Instituto de Máquinas-Ferramentas e Processos de Fabricação da Universidade Técnica de Braunschweig - IWF- TU/BS, sob orientação brasileira do Prof. W. L. Weingaertner e alemã do Prof. E. Westkämper e Prof. Dr.-Ing. H.-W. Hoffmeister, com apoio dos órgãos de fomento CAPES/DAAD e da Universidade UNOESC. Foi Pesquisadora visitante no IWF- TU/BS e no LMP/UFSC. Contribuiu para o Programa Catarinense de Reflorestamento e o programa Brasileiro de Proteção as Florestas Tropicais e Subtropicais, bem como no Projeto Catarinense de Manutenção do Pequeno Jovem produtor Rural no seu Hábitat através de formação de cooperativas florestais/moveleiras. Atualmente, é professora do departamento de Engenharia Ambiental e assessora da Pró-Reitoria de Ensino da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, representante da UNIVILLE na Comissão Municipal de Defesa Civil coordenando projeto internacional na área, membro do núcleo de estudos ambientais (NEA/UNIVILLE), membro da comissão de criação do curso de engenharia de materiais com ênfase para madeira e biomateriais (UNIVILLE), membro fundadora do Instituto Brasileiro de “ECODESIGN”, gerente do grupo multidisciplinar e interinstitucional de estudos em “Planejamento energético – energias alternativas- para a região nordeste do estado de Santa Catarina”, e Co-Orientadora do Prof. Eng. Evandro Bittencourt no Programa de Doutorado em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina “Processamento e Caracterização de Compósitos Lignocelulósicos a partir de Resíduos”. Ainda é consultora do CNPq na área de Tecnologia da madeira. Tem como “Hobby” a vida, a poesia e o conhecer lugares e pessoas.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do crescimento econômico, que intensifica as atividades humanas, está acelerando a destruição dos ecossistemas naturais e, conseqüentemente, a perda da biodiversidade no planeta. A destruição da natureza implica não apenas na interrupção da integridade de ciclos biológicos como também coloca em risco a própria sobrevivência humana, já que o homem depende da natureza para atender suas necessidades mais vitais.

A sabedoria de Mahatma Gandhi indicava que os modelos de desenvolvimento precisam mudar. Os estilos de vida das nações ricas e a economia mundial têm de ser reestruturados para levar em consideração o meio ambiente. Afinal, nenhuma decisão econômica pode ser feita sem afetar o meio ambiente. E nenhuma alteração ambiental pode ocorrer sem provocar impactos econômicos, por menores que sejam.

A proteção dos ecossistemas e a otimização de sua utilização requer soluções diversas que tenham em vista a conservação da natureza e também o uso sustentável dos recursos naturais. Mas tanto conservar quanto usar de forma sustentável não são tarefas fáceis. Além de envolverem fatores sociais, econômicos e políticos, ambas exigem a geração e a disseminação de conhecimento técnico e científico.

Durante um longo período produtos de madeira e de seus derivados tanto no segmento de consumo (artigos de cozinha, brinquedos, pequenos móveis, etc.) como no segmento de bens duráveis (móveis, janelas, portas, etc.) foram substituídos numa discreta competição por materiais como o plástico e o alumínio.

Entretanto, como resultado de pressões de organismos internacionais de proteção ao meio ambiente, vários países vêm desenvolvendo e implantando sistemas de verificação da qualidade ambiental dos produtos colocados no mercado, através dos “selos verdes”. A análise de um produto para o recebimento do selo verde considera o levantamento global do impacto do mesmo em todo seu ciclo de vida, incluída a sua produção, distribuição, uso e descarte.

Portanto, as mudanças de comportamento quanto aos aspectos ambientais promovem uma reestruturação no mercado internacional de matéria-prima, conquistando a madeira oriunda de “Floresta Plantada” (silvicultura moderna, silvicultura intensiva) seu “nicho” no mercado de

produtos florestais. Este tipo de madeira por ser renovável tem importância ascendente num mercado, onde além das pressões ecológicas, também a necessidade de redução de custos e a manutenção da competitividade são vitais.

O conceito amplamente utilizado <<man-made forest>> (florestas plantadas) não se aplica apenas para plantações madeireiras; empregado no sentido lato, ele designa todas as espécies de povoamentos criados artificialmente em superfícies nuas, incluindo as manejadas de acordo com os princípios da “silvicultura <<clássica>>”. As florestas de baixas latitudes como no sul do Brasil, apresentam, em geral, carácter de verdadeiras florestas industriais. Também chamada de silvicultura moderna.

A silvicultura moderna baseia-se em espécies exóticas, principalmente dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, e passa a ser denominada de silvicultura intensiva, pela sua semelhança com a agricultura intensiva, cujo fator „disponibilidade de espécies arbóreas florestais apropriadas“ descreve as seguintes exigências: crescimento rápido, resistência a danos bióticos e abióticos e simplicidade na reprodução, manejo e aproveitamento [LAMPRECHT, 1990].

O consumo atual de madeira de floresta plantada pelo segmento moveleiro é representado em sua maior parte pelo *Pinus*. Esta espécie é utilizada em móveis de madeira maciça, compensados, chapas, aglomerado, painéis colados, etc., em produção seriada ou sob medida. Existe já à nível de Brasil toda uma estrutura de mercado organizada e plenamente funcional para a madeira de floresta plantada [COSTA, 1996].

Estimativas prevêem para o ano 2005, que o Brasil terá problemas de oferta de madeira de *Pinus* para o processamento mecânico, consequência do déficit da ordem de 1.335.000 m³/ano [DONNELLY e SUCHEK, 1996]. Existem também previsões que o consumo de madeira roliça para fins industriais vai crescer dos 1,6 bilhões m³ registrados em 1991 para 2,6 bilhões de m³ por volta do ano 2010, enquanto que o consumo de madeira serrada empregada pelo setor moveleiro vai passar de 456 para 745 milhões de m³, e o de painéis à base de madeira crescerá de 121 para 313 milhões de m³ no mesmo período [GRESHAM, 1997]. Quando considera-se separadamente as madeiras tropicais, as previsões são unânimes em indicar uma queda constante nos volumes disponíveis para corte.

Assim, é premente a necessidade de se buscar alternativas de madeiras para o abastecimento das indústrias de base florestal. De tal modo, que se presume que a madeira de *Eucalyptus* terá uma participação ainda mais importante no mercado de produtos florestais,

desde que hajam desenvolvimentos tecnológicos [FLÂNDOLI SOBRINHO, 1996] e ainda mais investimentos em reflorestamento [GRESHAM, 1997].

Eucalyptus é, atualmente, a mais importante espécie de floresta plantada a nível mundial.

O *Eucalyptus grandis* é, indiscutivelmente, o tipo de eucalipto mais plantado no mundo [JACOBS, 1981]. O *Eucalyptus grandis* é considerado uma das espécies mais promissoras no mercado internacional pelos seguintes motivos: maior área plantada dentre as espécies comerciais; a nível de Brasil, trata-se da espécie mais difundida em plantios comerciais; maior disponibilidade imediata de florestas em idade de corte e, principalmente, por tratar-se de madeira leve e de boa resistência.

O *Eucalyptus dunnii* vem recentemente sendo alvo de estudos mais aprofundados para uso múltiplo, pelo seu potencial como indicação para plantios em áreas de ocorrência de geadas [HIGA, 1997]. É considerada atualmente uma importante alternativa florestal para os pequenos produtores, empresas florestais, e para o setor moveleiro. De coloração clara e textura decorativa promete ser uma opção muito interessante no segmento de móveis e de laminados, devido a tendência dos ambientes residenciais populares e comerciais serem cada vez menores, exigindo móveis de tons claros para dar a impressão de amplidão ao espaço em questão. Promete, ainda, ser uma grande opção para o setor da construção civil, área de estruturas e assoalhos, em função da sua elevada densidade.

O Brasil possui, hoje, um patrimônio genético imensurável para o gênero *Eucalyptus*, para ser convenientemente utilizado pela silvicultura intensiva. Muitos programas de melhoramento genético, iniciados em 1966, que já atingiram a idade de 30 anos, podem, portanto, ser considerados com maturidade adequada para futuras decisões [FERREIRA e SANTOS, 1997].

Os progressos no setor florestal na obtenção de madeiras de Eucalipto, que buscam atender as exigências do segmento moveleiro, e pelos grandes investimentos já realizados e recentemente programados pelas empresas florestais nacionais e multinacionais no Brasil, é de se esperar que tais materiais venham a ter no futuro um emprego cada vez maior em elementos não somente para produtos acabados como também, em larga escala, para partes, peças, componentes e produtos semi-elaborados. Desta forma, a caracterização tecnológica, especialmente ensaios de usinabilidade utilizando tecnologias modernas de fabricação, realizada em centros de excelência em Tecnologia de Usinagem de Madeiras permite o aumento da credibilidade pelo mercado internacional destas alternativas propostas pelo setor florestal brasileiro, bem como poder

trabalhar em condições econômicas e de qualidade assegurada que devem permitir uma melhoria do processo produtivo, o desenvolvimento de novas máquinas-ferramentas e de ferramentas.

A desvantagem da madeira maciça, e com restrições, também, os seus derivados, com relação a outros materiais, independente de sua origem floresta plantada ou natural, é que elas podem ser transformadas ou usinadas somente com domínio tecnológico considerável do processo de fabricação e em formas muito limitadas.

Os países tradicionalmente reconhecidos como fabricantes e exportadores de máquinas-ferramentas para usinagem de madeira e de seus derivados como, por exemplo, a Alemanha, consequência do investimento em inúmeras bem sucedidas pesquisas em medidas de racionalização e otimização do processo diretamente relacionada com controle e automação, consideram que os processos de remoção de madeira apresentam uma tecnologia bastante avançada nos países desenvolvidos, destacando que o processo de fresamento de madeiras maciças seja considerado ainda uma abordagem muito importante, principalmente quando associado a utilização da tecnologia de fresamento em faixas de velocidades, que viabilizam valores de rugosidade similares aos do processo de lixamento.

O fresamento é um dos processos de fabricação mais utilizados na usinagem de madeiras maciças e de seus derivados, e o processo de fresamento de perfil (periférico e de topo conjugados) devido a diversidade de possibilidade de aplicações é considerado o mais importante para o segmento moveleiro [HEISEL e KRONDORFER, 1996, GORGES-FARIAS, 1996]. Ele possibilita perante o processo de serramento, em regra, a garantia de uma melhor qualidade superficial e perante ao processo de lixamento uma elevada taxa de remoção [Fuß, 1995, GORGES-FARIAS, 1996; HOFFMEISTER, GORGES-FARIAS e SCHNNETTKER, 1998].

A principal vantagem do fresamento em altas velocidades é a elevada economia. Através do aumento da velocidade de avanço e da taxa de remoção podem ser reduzidos os tempos de fabricação em até 70% e os custos de produção em 50% [JAUCH, 1992]. Resulta-se, então, as vantagens técnicas de aplicação. As forças de usinagem podem ser reduzidas em até 30% [SCHULZ, 1987], com isso pode-se obter peças com espessuras finas com elevada precisão de forma na fabricação. Também o carregamento térmico na peça e na ferramenta são menores devido a melhor condução do calor na remoção do cavaco, que simultaneamente implica que para o menor tempo de trabalho, pode-se obter, no caso de corte longitudinal e transversal, textura superficiais melhores [FUß1996, SCHULZ, 1987].

A garantia de melhoria no acabamento superficial através desta tecnologia atende as exigências ambientais e da redução de custos, pela eliminação ou diminuição do uso na etapa de acabamento de diversos produtos naturais e sintéticos, e principalmente a necessidade de aplicação de massa ou pré-massa após a aplicação do selador e antes do verniz.

A tecnologia fresamento em altas velocidades de madeiras maciças, caracterizada então pelo aumento da produtividade com a manutenção ou melhoria do acabamento superficial exigido pelo setor moveleiro, tem garantido um lugar de destaque na tecnologia de fabricação do futuro.

Os novos avanços na eficiência do processo de usinagem e na obtenção de excelente acabamento superficial final da peça ainda estão limitados pela falta de conhecimento dos mecanismos básicos que governam o processo de fresamento em altas velocidades na fabricação de elementos de madeiras a partir de madeiras de Eucalipto. Elas possuem estrutura anatômica e composição química diferenciada das madeiras já analisadas em pesquisas anteriores [GORGES-FARIAS, 1999].

Em virtude da necessidade de produção de elementos para a indústria moveleira com qualidade cada vez melhor através de processos de fabricação reproduzíveis e economicamente viáveis, é necessário um conhecimento cada vez mais profundo dos processos de fabricação empregados e dos fenômenos que ocorrem durante a geração de peças. No caso da fabricação através de processos de usinagem, é importante o conhecimento não apenas de cada parâmetro de fabricação sobre o resultado final do trabalho, mas também como a textura (geometria) superficial permite conclusões sobre o processo de usinagem, bem como sobre as ferramentas e máquinas usadas. Por exemplo, vibrações na máquina causam ondulações, e dentes quebrados na fresa causam marcas de dentes na superfície da madeira fresada.

A evolução da topografia superficial da madeira tem como objetivo assegurar tanto a qualidade do produto como também monitorar o processo de usinagem e a máquina ferramenta [GORGES-FARIAS, 1992]. No chão de fábrica, a evolução da superfície da madeira é realizada pelo toque manual e exame visual os quais, naturalmente, não fornecem resultados reproduzíveis. Tais resultados são necessários, ainda assim, para estabilizar os sistemas de controle automático de processo.

A informação dada para valores característicos de rugosidade são usados na usinagem de metais, entretanto, na usinagem de madeiras torna-se muito limitada por causa da estrutura heterogênea, em alguns casos extremamente porosa, que possui. Portanto, é necessário distinguir

entre a estrutura dispersa e específica da madeira e elementos estruturais gerados pelo processo de usinagem.

No IWF-Braunschweig, através de um novo método denominado “filtro de poros” [SCHADOFFSKY, 1997], procura-se distinguir as características topográficas originais da anatomia da madeira das do geradas pelo processo de usinagem. A importância da influência das variáveis de trabalho sobre a textura superficial (rugosidade), o mais importante parâmetro para o segmento moveleiro e de artigos de madeira, é pela primeira vez analisada e testado intensivamente para madeiras de Eucalipto de áreas subtropicais brasileiras.

Para entender ainda melhor os mecanismos de remoção que ocorrem e entender com mais profundidade os fenômenos que têm influência sobre a qualidade final de trabalho, a necessidade de medição de forças na usinagem já é reconhecida há muitos anos. No caso da usinagem convencional o comportamento das forças durante o processo de remoção de cavacos é um assunto extensamente estudado, e mesmo para a usinagem de madeiras já foram realizadas diversas pesquisas sobre o comportamento das forças de usinagem. Entretanto, até o momento não foram realizados trabalhos dedicados a medição de forças para a usinagem em altas velocidades de madeiras nacionais de Eucalipto, e a respectiva análise de sua influência em função de faixas de avanços empregados pelo segmento moveleiro e de artigos de madeira em operações de usinagem de madeiras maciças para a obtenção de excelente acabamento. Isto ocorre, principalmente, em função das grandes dificuldades metrológicas existentes. A dinâmica dos sinais de força que ocorrem durante a usinagem em altas velocidades de madeiras maciças com ferramenta de metal duro é elevada.

As forças de usinagem oferecem referência sobre o carregamento no gume da ferramenta, na peça e na máquina-ferramenta. A partir destas informações pode-se determinar a potência de acionamento do eixo árvore da máquina-ferramenta e dos avanços. Através das forças pode-se ter uma estimativa do estado do gume e com isso a rugosidade na peça esperada, bem como a deformação na sua camada superficial. A medição das forças de corte é dificultada pelas perturbações do processo. Portanto, a montagem da cadeia de medição é decisiva para a qualidade na medição destas forças.

A investigação desenvolvida no Instituto de Máquinas Ferramentas e Processos de Fabricação (setor de tecnologia de madeiras) da Universidade Técnica de Braunschweig - Alemanha, centro de excelência a nível mundial na área de usinagem de madeiras, procurou de forma coerente e formal comprovar a substituição da madeira nativa de florestas tropicais e subtropicais do Brasil por madeiras de floresta plantada como fonte de matéria-prima para a

indústria moveleira alemã e brasileira, segundo a concepção e exigência ambientais e o domínio de parâmetros tecnológicos.

Procura-se com este trabalho contribuir, ainda, para um maior conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante a usinagem de madeiras de Eucalipto e da caracterização tecnológica destas espécies, de modo a permitir a produção otimizada de elementos de madeira com o uso do processo de fresamento empregando alta velocidade, bem como fornecer tanto para a Alemanha quanto para o Brasil informações das características de usinabilidade das madeiras alternativas brasileiras - *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* - quando comparadas diretamente com a madeira européia - *Fagus sylvatica*.

Os dados obtidos neste estudo, portanto, serão disponibilizados para a indústria fabricante de máquinas-ferramentas e ferramentas, bem como para os usuários destas, além de contribuir para o aumento da utilização destas espécies pelo setor moveleiro e de artigos de madeira.

A investigação sistemática de madeiras „alternativas“ empregando novas tecnologias de fabricação permite, então, uma conexão rápida e simultânea entre o meio científico, industrial e comercial e, ainda, acelerar o desenvolvimento e otimização de importantes etapas do processo produtivo no setor florestal e moveleiro. Assim, novas cadeias produtivas podem ser desencadeadas numa escala sem precedentes, onde a madeira, por ser renovável, tem importância ascendente num mercado globalizado, onde vitais para a manutenção da competitividade são os aspectos ambientais que tem-se tornado cada vez mais importante associados a necessidade de redução de custos e o domínio de tecnologias de processo, através da qualificação de mão-de-obra, maior qualidade dos produtos, geração de novos conhecimentos e modernização do parque fabril.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. O FRESAMENTO EM ALTAS VELOCIDADES DE MADEIRAS MACIÇAS E DE SEUS COMPOSTOS

O fresamento é um dos processos de fabricação mais utilizados na usinagem de madeiras maciças e de seus compostos, e o processo de fresamento conjugado de topo e periférico devido a diversidade da possibilidade de aplicações é considerado o mais importante para o segmento moveleiro. Ele possibilita perante o processo de serramento, em regra, a garantia de uma melhor qualidade superficial e perante o processo de lixamento uma elevada taxa de remoção [Fuß, 1996; HEISEL, 1997; SCHNETTKER E GORGES-FARIAS, 1998; GORGES-FARIAS, 1999].

Para a aplicação na indústria de transformação da madeira os perfis fresados podem ser classificados de acordo com o emprego segundo a função e a decoração (ornamentação) (**Figura 1**).

Segundo a função trata-se de perfis de ligação de união, que são montados por conexão, por encaixe ou com cola. Como exemplo cita-se os de ligação macho e fêmea, na fabricação de esquadrias para a construção civil, e, ainda, as conexões com cauda de andorinha e de ranhura (encaixe).

Ranhuras, geralmente com formato retangular, são elementos geométricos importantes para os fabricantes de móveis, janelas e portas, bem como outros tipos de peças para vedação (calafetagem), para sobreposição ou para o rebordeamento para painéis. Ranhuras (encaixes) são fabricados geralmente em fresadoras. Com a finalidade de se garantir a segurança da função do perfil, exige-se a observância em primeiro plano das tolerâncias dimensional e de forma, bem como da sua textura superficial.

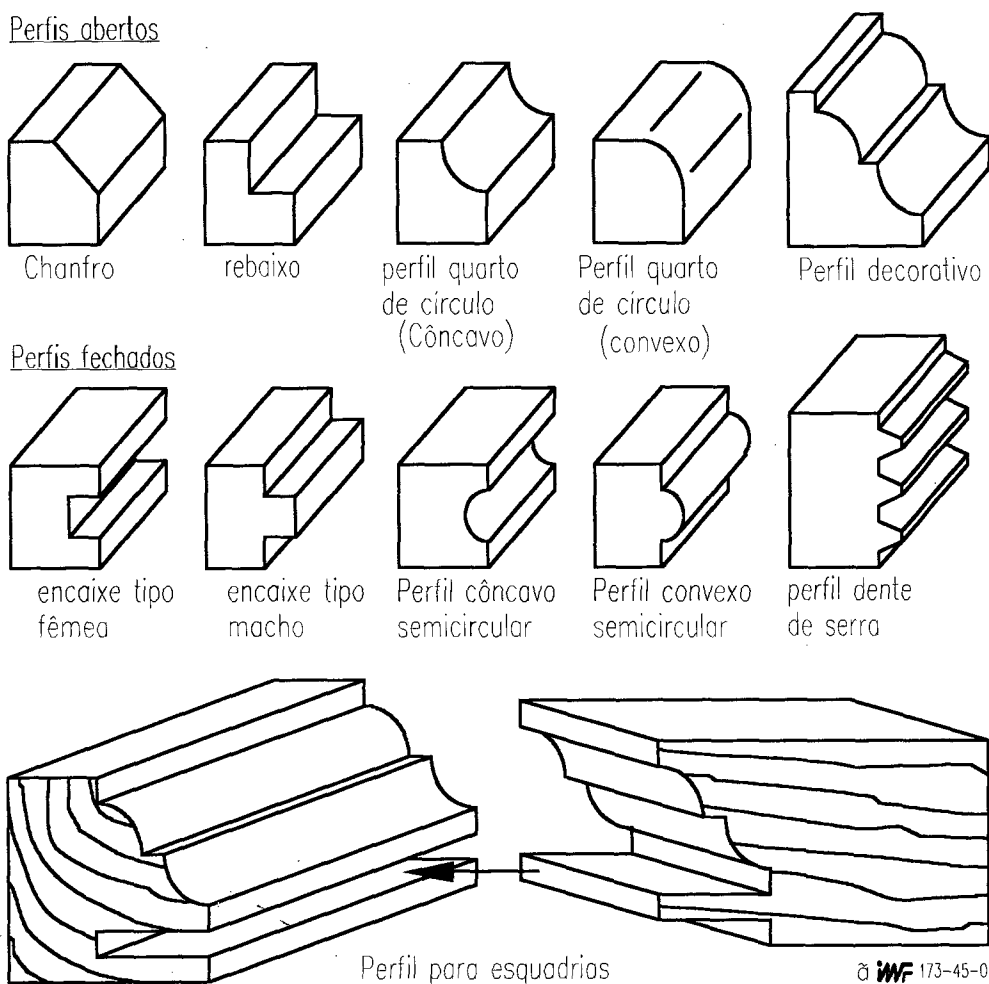


Figura 1 – Exemplos de perfis fresados de madeiras maciças e de seus compostos na indústria moveleira e de artigos de madeira.

Os valores de velocidade de corte e velocidade de avanço para a usinagem de madeiras, em comparação com a usinagem de metais, são mais elevados; isto é também válido para o processo de fresamento. Dependente do processo de fabricação e do material da peça encontram-se os valores de velocidade de corte entre 40...100 m/s (Serramento), 40...90 m/s (Fresamento de madeira maciça) ou 30...80 m/s (Fresamento de chapas de aglomerado). Em trabalhos de pesquisa realizados no IWF – Braunschweig por Pahlitzsch, Saljé, Jostmeier e Sandvoß foram empregadas velocidades de corte na faixa de 25...65 m/s [JOSTMEIER, 1966; PAHLITZSCH, 1966; SALJÉ, 1977; SANDVOß, 1971]. Stühmeier [STÜHMEIER, 1989] investigou a influência da velocidade de corte em faixas acima de 65 m/s sobre as grandezas de processo para o fresamento de chapas de aglomerado revestido. Foram mostrados também através de análises econômicas, que o custo ótimo do emprego de velocidades de corte pode ficar distintamente mais elevada do que os utilizados na prática convencional.

A tecnologia fundamental e o potencial econômico do emprego de altíssimas velocidades na usinagem de madeiras e de seus compostos também foram investigados no IWF - Braunschweig [FUß, 1992, 1994; KISSELBACH, 1992, 1993; WESTKAEMPER E FUß, 1992A, 1992B, 1992C, WESTKAEMPER, FUß E KISSELBACH, 1993]. Para o fresamento periférico em laboratório foi possível serem realizadas velocidades de corte até 200 m/s. Para o fresamento de topo com „fresa de topo“ foram empregadas rotações até 55.000 min⁻¹. Concluiu-se que, com o fresamento em altas velocidades é possível uma clara elevação da produtividade. Os ensaios realizados mostraram que com velocidade de corte constante (avanço constante) o aumento da produtividade depende da elevação da rotação pelo aumento da velocidade de corte e não pelo aumento do diâmetro da fresa. Para as diferentes combinações entre o material da peça e o material da ferramenta foram assegurados que, com o aumento da velocidade de corte, não ocorreram uma considerável redução do percurso de corte. No fresamento de madeira maciça foi atingido um aumento da qualidade superficial somente para os cortes longitudinal tangencial e transversal.

Máquinas-ferramentas para a indústria moveleira produzidas em países desenvolvidos como por, exemplo, a Alemanha e a Itália, já operam com velocidades de avanço de até 100 m/min e com os tipos de materiais de ferramenta de corte disponíveis no mercado já seria possível trabalhar com velocidades de corte de até 200 m/s [FISCHER, 1997].

Entretanto, o processo de fabricação, sob condições de produção industrial, somente transcorrerá de forma econômica e, principalmente, com a garantia de obtenção de um bom acabamento superficial da peça, conforme as exigências do cliente, se houver a interação quase que perfeita do grande número de variáveis envolvidas.

Atualmente, a indústria moveleira poderia estar satisfeita com a evolução tecnológica dos processos de usinagem de madeiras e de seus compostos, se não fossem as desvantagens. Além da excessiva geração de ruído e pó, existem os perigos mecânicos que exigem contramedidas dispendiosas [HEISEL, 1994; NIEMEYER, 1995]. Ainda, a qualidade superficial exigida da peça é atingido somente com a precisão e rigidez elevada de todos os componentes móveis e fixos da máquina-ferramenta. E por último, ocorrem com o aumento da velocidade de corte, em regra geral, a redução do percurso usinado, o aumento do desgaste da ferramenta com a conseqüente necessidade de utilização de mais ferramentas ou paradas para a reafiação das ferramentas. Todas essas conseqüências são causadoras de elevação dos custos [FISCHER, 1997].

A solução viável seria portanto o aumento da produção seriada, que contraria as tendências do mercado pela falta de um mercado consumidor que exige cada vez mais produtos com diferentes “Design” e baixos custos; e que, ainda, coloca em “xeque” os acordos históricos do setor moveleiro, que mundialmente tem o compromisso com a geração de empregos.

Para países emergentes como o Brasil, estas máquinas adquiridas na Alemanha ou na Itália possuem custos elevadíssimos muitas vezes incompatíveis com o poder de compra das empresas do setor moveleiro nacional.

A tecnologia de fresamento em altas velocidades, caracterizada, então, pelos custos mais baixos comparativamente de máquina-ferramenta, pela elevada produtividade com a manutenção ou em alguns casos melhoria do acabamento superficial, comparáveis aos resultados obtidos no processo de lixamento, exigido pelo setor moveleiro, tem garantido sempre ainda um lugar de destaque na tecnologia de fabricação moveleira por atender o compromisso entre tecnologia, custos, mercado e questões sociais.

A configuração dos diferentes fatores de influência sobre a produtividade e o acabamento superficial da peça de madeira obtida através do processo de fresamento em altas velocidades é mostrada esquematicamente na **Figura 2**. Os fatores de influência podem ser classificados entre parâmetros de entrada do processo ou grandezas de influência no processo, parâmetros do processo, e grandezas de saída do processo.

Como **parâmetros de entrada** integram todas as grandezas que externamente influenciam no processo, bem como as condições existentes do ambiente. São a máquina-ferramenta e seus componentes, e os seus valores nominais como, por exemplo, rigidez e amortecimento. A ferramenta e a peça e as respectivas grandezas com seus parâmetros específicos e as grandezas de ajuste, exemplarmente a velocidade de corte e de avanço. São, também, as condições de compatibilidade externa como a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e também, por exemplo, devem ser observados o efeito do sistema de exaustão do pó gerado na remoção dos cavacos.

Os **parâmetros do processo** são significativos para a interpretação e o entendimento da dependência e da evolução atual do processo de usinagem, permitindo uma conclusão sobre a simples interação das componentes do processo. Cita-se, neste caso, as forças de usinagem, e o desgaste da ferramenta.

Finalmente, os **parâmetros de saída** são decisivos para as possibilidades de aplicação prática de um processo, pois descrevem o potencial para uma aplicação econômica na produção.

Dentre estes cita-se o acabamento superficial da peça, e através de uma elevada segurança do processo também deve ser garantido a produtividade e a rentabilidade. Não menos relevante, também deve ser levado em consideração os aspectos relativos a segurança do trabalho.

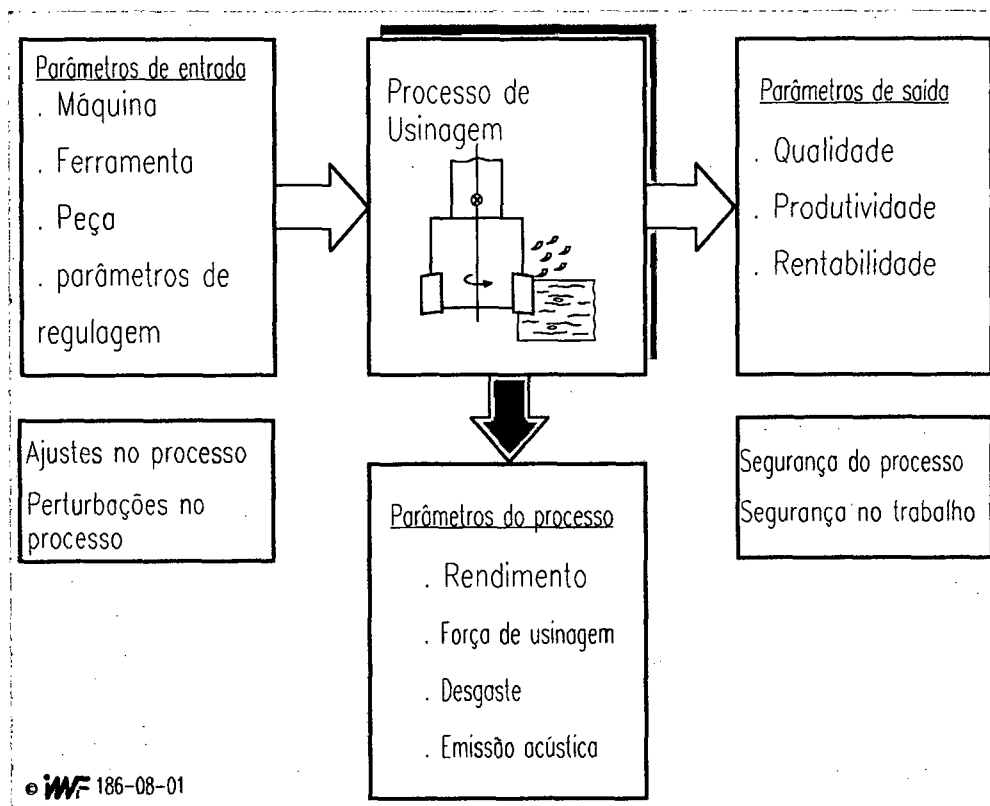


Figura 2 – Fatores de influência sobre o acabamento superficial no fresamento de madeiras maciças e de seus compostos [Gorges-Farias, 1999]

2.2. MÁQUINA-FERRAMENTA

O desenvolvimento do mercado internacional de produtos de madeira requer eficiência econômica e produtividade de máquinas-ferramentas para promover a melhoria do processo de usinagem de madeiras e de seus compostos [HEISEL, 1997].

Para desempenhar sua tarefa, a máquina-ferramenta deve garantir duas funções básicas. Primeiramente, a realização do movimento relativo entre ferramenta e peça. Ambas sempre estão interligadas sobre diferentes elementos com a estrutura da máquina-ferramenta e devem ser deslocadas uma contra a outra de acordo com o movimento programado do avanço com a mais elevada velocidade e precisão possível. O movimento atual de corte é sobreposto nesse processo [HEISEL, 1996]. Ainda é necessário, também, que sejam gerenciadas no processo de usinagem

as forças correspondentes. Nessa ocasião não devem surgir nenhum contorno não desejado ou vibrações que geram erros na superfície da peça.

Consequentemente, os fabricantes de máquinas-ferramentas precisam gerenciar exigências contraditórias: uma elevada dinâmica, com uma estrutura leve por um lado e por outro uma elevada rigidez. A maior eficiência disponível dos componentes e elementos da máquina-ferramenta, bem como o preço, determinam decisivamente os limites técnicos e econômicos no desenvolvimento e aplicação de máquinas-ferramentas, inclusive de fresadoras [MUTSCHLER, 1997]. O desenvolvimento de quase todos esses componentes viabilizou uma nova performance para o processo de fresamento de madeira e de seus compostos.

A estrutura das fresadoras para o fresamento de madeira e de seus compostos é influenciada principalmente pelas forças de corte relativamente baixas. A força de corte referencial média, por exemplo, para o fresamento de chapas de aglomerado de 6 N/mm^2 é aproximadamente 20 vezes menor do que para a usinagem de alumínio. Além disto, a exigência da precisão dimensional na usinagem de madeiras é muito pequena. Exigidos são, em regra geral, precisões dimensionais na ordem de 0,1 a 0,5 mm. Consequentemente, as máquinas-ferramentas podem apresentar uma construção muito leve e, comparativamente, uma elevada velocidade de avanço.

Na usinagem em altas velocidades deve-se observar os componentes da máquina-ferramenta, responsáveis pelas funções pré-determinadas de projeto.

Os elementos de uma máquina-ferramenta para o fresamento em altas velocidades de madeiras e de seus compostos são, em princípio, os mesmos que de uma máquina-ferramenta convencional. Dentre os mais importantes, podem-se citar:

- Base, componentes construtivos da base e guias da máquina-ferramenta;
- Comando e Acionamento;
- Acionamento principal;
- Sistema de fixação da ferramenta; e,
- Sistema de fixação da peça.

2.2.1. BASE, COMPONENTES CONSTRUTIVOS DA BASE E GUIAS DA MÁQUINA-FERRAMENTA

As bases das máquinas servem de estrutura para o suporte das guias, a árvore de acionamento (cabeçote) e seus mancais, bem como de outros elementos, tais como sensores de medição e suportes de acionamentos. Sua principal função é fornecer rigidez estática e dinâmica para a estrutura da máquina-ferramenta, de modo a que esta venha a sofrer a mínima deformação possível quando da ação de carregamentos ou ações dos elementos externos.

A base da máquina-ferramenta para o fresamento de madeira maciça e de seus compostos distingui-se entre duas formas básicas de construção, definidos de acordo com a função em **máquinas contínuas ou de passagem** e as **máquinas para trabalho estacionário**.

Nos **processos industriais contínuos** são empregados máquinas automáticas, principalmente, para o desdobramento ou recorte de arestas (cantos) de peças laminadas em forma de chapas como, por exemplo, de aglomerado ou de MDF (*Medium Density Fiber*), bem como máquinas automáticas para aplainar e moldurar cantos de vigas de madeira maciça como, por exemplo, para a fabricação de esquadrias de madeira. Para as máquinas contínuas é comum, que o movimento de avanço seja, em regra geral, uniforme e linear. O avanço é transmitido à peça através do acionamento por roda de atrito ou tracionamento com corrente. Neste caso, portanto, não é necessário uma dinâmica elevada para realizar os movimentos do processo.

A base de máquinas para aplainar e moldurar são normalmente fabricadas em ferro-fundido ou aço fundido ou soldado. O uso do ferro fundido em máquinas-ferramentas foi amplamente difundido, entre os fabricantes de máquinas em geral no mundo todo. A grande difusão dos emprego de bases de ferro fundido na fabricação de máquinas deve-se ao seu reduzido custo, fácil fabricação, elevadas estabilidade e coeficiente de amortecimento de vibrações, e, alta rigidez, apesar da pequena resistência química à corrosão e oxidação do ferro fundido. Para bases, colunas de mesas e guias em máquinas-ferramentas utiliza-se ferro-fundido de grãos finos.

Com o correspondente dispositivo são fixados os fusos horizontais e verticais. A base para máquinas contínuas para o desdobramento ou o recorte de arestas de chapas laminadas são fabricadas, em regra geral, na forma de quadro. Sobre ele são montados segundo o comprimento da máquina de uma até dez ou ainda mais colunas na máquina, onde são montados os agregados freqüentemente com três ou mais eixos móveis. Segundo cada tipo de construção as

transportadores de corrente, que transportam ou fixam as peças, são fixadas na base ou nas colunas da máquina.

As máquinas-ferramentas para o **fresamento estacionário** se diferenciam muito pouco da construção básica de máquinas-ferramentas para a usinagem de metais. Usual são em ambos os casos os modelos de colunas e de portal. As bases para as grandes máquinas são quase que exclusivamente construídas de aço soldado. Para poder ser possível o complexo movimento entre ferramenta e peça, o trabalho para o aumento do rendimento do processo é considerável e dispendioso. Aqui, não somente é importante a rigidez, já exigida para máquinas contínuas, mas adicionalmente também a exigência de melhoria da dinâmica para todos os componentes móveis da máquina-ferramenta obtida por uma construção mais leve.

Para o processo de remoção de metais e plásticos já são empregados os princípios para a melhoria da base de máquinas-ferramentas. A construção em concreto [GERLOF, 1989] ou concreto polimérico [WIELE, 1994], por exemplo, claramente oferecem melhores valores de amortecimento. O concreto é constituído por areia, cascalho, pedra moída, agregados por uma massa pastosa de cimento e água. A mistura dos ingredientes, em proporções adequadas forma uma massa plástica que pode ser fundida ou moldada em formas pré-determinadas. Suas principais vantagens são boa trabalhabilidade, alta durabilidade, alta resistência a ação do tempo, e, alta resistência química.

Para possibilitar a redução do peso dos componentes móveis poderiam ser utilizados materiais alternativos com uma melhor rigidez específica como, por exemplo, a alumina (Al_2O_3) ou resinas reforçadas com carbono - CFK [SCHNEIDER, 1988]. Os materiais cerâmicos (alumina) apresentam muitas vantagens em relação aos materiais tradicionais, tais como o aço. As principais vantagens do uso de materiais cerâmicos como elementos estruturais em máquinas-ferramentas estão na elevada rigidez, estabilidades dimensional e térmica, resistências ao desgaste e química. Mas possui desvantagens, como a baixa capacidade de amortecimento que, entretanto, pode ser contornada por meio do uso de amortecedores e dissipadores estruturais. Comparativamente com outros materiais apresentam altos custos de obtenção e usinagem [TAVARES, 1999].

As **guias** são elementos fundamentais e constituem uma parte delicada de uma máquina-ferramenta. Suas funções são guiar a ferramenta na região de corte, e assim como todas as demais partes de uma máquina-ferramenta, estas devem ser construída o suficientemente rígidas para que variações de forma que se originam da ação de forças estáticas e dinâmicas provenientes dos esforços de corte, assim como dos movimentos, não venham a exceder a limites

preestabelecidos, prejudicando a exatidão geométrica e dimensional, além da qualidade superficial.

As guias podem ser classificadas de três formas distintas: quanto a forma da seção transversal (prismáticas, planas e cilíndricas); quanto a segurança contra a desmontagem; e quanto ao tipo de atrito ou forma de movimento (guias de deslizamento, de elementos rolantes, de molas, e hidrostáticas e aerostáticas).

No caso de máquinas-ferramentas para o fresamento contínuo de compostos de madeira, embora as necessitem uma elevada exigência estática, admitem uma dinâmica muito menor quando comparada com a usinagem de metais ou o fresamento estacionário de madeiras. Podem ser empregadas tanto guias planas como cilíndricas. Sistemas de ajustagem e de aperto são ainda utilizadas em máquinas convencionais manuais. Também são encontrados sistemas pneumáticos com comando de cames, bem como com fusos.

Fresadoras estacionárias, por sua vez, exigem um sistema de guias com elevada dinâmica. Quase que exclusivamente, são empregadas modernas guias lineares com roletes ou esferas recirculantes. A qualificação de máquinas-ferramentas com elevada dinâmica foi investigada por Schneider (1991).

2.2.2. SISTEMAS DE CONTROLE E ACIONAMENTOS

É o centro de comando para o controle de posição, velocidade, rotação e direções dos movimentos dos elementos de máquina, sendo normalmente composto por sensores e um controle numérico de boa resolução.

Controle e acionamentos são importantes para o desempenho, os movimentos mais rápidos, mas descontínuo dos movimentos entre a posição da ferramenta e da peça. Consequentemente, a contribuição potencial deste sistema para o aumento do rendimento é muito maior para o fresamento estacionário do que para o fresamento contínuo ou por passagem [BEYER, 1991].

Com base na considerável eficiência dos comandos numéricos, bem como da disponibilidade das técnicas de controle digital, se oferece um considerável potencial para a elevação da velocidade de avanço, a melhoria da precisão e para o aumento do conforto na operação. Estas melhorias ainda representam um investimento maior para os usuários, mas estes não inviabilizam sua utilização.

As funções *Look Ahead* possibilitam uma condução dos movimentos de forma inteligente e previsível. A dinâmica do comando piloto em ligação com perfis de aceleração mecânicos possibilitam processos rápidos de aceleração e parada, sem sobrecarregar os componentes mecânicos da máquina-ferramenta [BEYER, 1994].

A diferença fundamental entre as técnicas de controle analógica e digital compreende que a comunicação entre o comando e os controles de acionamento não acontecem mais através do sinal de tensão analógico, mas sim através de mensagens codificadas digitalmente. Desta forma, os motores de acionamento atuam essencialmente de força uniforme e podem posicionar de forma precisa. Isto se reflete no aumento da precisão e na melhoria do acabamento da peça. Através do balanceamento, permite-se efetivamente compensar imprecisões na parte mecânica da máquina-ferramenta por causa do atrito, folgas e torção. Erros de seguimento neste caso, são minimizados ou até evitados [HUG, 1993].

2.2.3. ACIONAMENTO PRINCIPAL

O acionamento principal determina efetivamente o rendimento de um processo de usinagem. Para o trabalho industrial de fresamento em máquinas automáticas de aplainar e moldurar são empregados fusos acionados por correias, e, em alguns casos, por motoárvores. Para máquinas automáticas para o desdobramento ou recorte de cantos de peças laminadas são empregados quase que exclusivamente motoárvores.

A solução de fusos acionados por correias oferece a vantagem de preços mais favoráveis, onde podem ser aplicados motores elétricos padronizados, e através da escolha correspondente não será necessário um regulador de frequência. Além disto, o fuso e o motor de acionamento podem ser dispostos em ambientes separados. A desvantagem é a grande área necessária para alojá-lo; o estabelecimento de uma rotação constante; e, a necessidade, que a árvore com a ferramenta seja lentamente acelerada ou parada.

A motoárvore, ao contrário, apresenta a árvore integrada ao motor de acionamento, oferece a vantagem da construção compacta, rotação variável e elevada dinâmica.

Geralmente em fresadoras para a usinagem de madeiras são comuns sistemas de fuso principal com mancais de elementos rolantes. Com isso se abdica, normalmente, das técnicas mais avançadas de mancais, em favor de custos de investimentos mais baixos. Ainda, aqui em especial, a faixa atual de rotações de até 20.000 rpm existentes comercialmente, oferecem claramente reservas disponíveis. Outras possibilidades existentes são através do emprego de

mancais magnéticos [ARNOLD, 1984; WECK, 1990-1; HÖRSEMAN, 1992], que tecnologicamente oferece muito mais possibilidades, mas é também muito mais caro; ou através do emprego de mancais aerostáticos, cuja vantagem está na elevada precisão e bom amortecimento [WECK, 1990-1].

As exigências para o sistema do fuso principal são, inicialmente, a potência necessária, a elevada rigidez, o bom amortecimento, o bom comportamento da rotação, e uma boa relação preço-potência. Existem, entretanto, exigências específicas para a usinagem de madeiras que devem levar em consideração. A elevada estanqueidade, a insensibilidade ao pó gerado durante a remoção e robustez decorrente do fato de que, freqüentemente, são utilizadas ferramentas inadequadamente balanceadas. O problema do aumento dimensional axial através da dilatação térmica e da força centrípeta [MAYER, 1989], que pode levar à uma variação dimensional, que possui significado secundário na usinagem de madeiras.

2.2.4. SISTEMA DE FIXAÇÃO DA FERRAMENTA

A interface entre o cabeçote e a ferramenta situa-se no fluxo de forças entre a ferramenta e a máquina-ferramenta. A otimização da configuração desta interface não tem somente o objetivo de um elevado desempenho, mas também garantir a qualidade da peça. Além disso, a concepção de projeto deste sistema tem uma grande influência na praticabilidade da troca da ferramenta rápida e automática.

Com a finalidade de se atender as exigências citadas, a interface deve poder transferir elevadas forças e momentos, sem ser distorcido estática ou dinamicamente. Para a obtenção de uma superfície livre de erros são necessários uma boa repetibilidade na troca da ferramenta, uma elevada precisão de rotação da ferramenta obtido através de um balanceamento adequado..

Para o processo de fresamento diferenciam-se entre ferramentas de topo e de perfil. Para ferramentas de perfil trata-se, em geral, de uma ferramenta com um furo cêntrico que é montada no eixo principal do motor. Ferramentas de topo, ao contrário, são fixadas com seu corpo no sistema de fixação da ferramenta. Este sistema de fixação pode estar assentado na extremidade da árvore ou pode tratar-se de um mandril fixo na extremidade da árvore.

A fixação direta é preferida a indireta da fresa, por causa da menor massa movimentada pelo fato de em cada interface existir uma perda adicional na rigidez. Para fresas de perfil, a fixação direta é comum. As ferramentas são providas de cubos e ranhuras de chaveta, e são fixadas por meio de parafusos, arruelas centradas e, eventualmente, posicionadas com anéis de

afastamento, que são elementos baratos. O movimento de giro, entretanto, por causa das folgas, é raramente perfeitamente circular. Ferramentas com fixação hidráulica, por sua vez, oferecem uma precisão de concentricidade na ordem de 5 μm . Eles são mais caros e, em regra, mais pesados. Ambos sistemas de fixação são também disponíveis para fixação indireta através de flange ou pinça.

Ferramentas de topo podem ser fixadas, portanto, direta ou indiretamente. Com base nos baixos valores de comprimento em balanço são preferíveis a fixação direta da ferramenta. Como interface são empregados na indústria moveleira, principalmente, cones com ângulo obtuso (*Steilkegel*) SK 30 e SK 40 /DIN 69871/. Na Indústria Moveleira é ainda empregado o cone oco HSK (*Hohlschaftkegel*) como, por exemplo, o modelo HSK 25 R /DIN V 6889/. O sistema de fixação do tipo HSK foi desenvolvido especialmente para elevadas rotações [HEISEL, 1997] e oferece em comparação ao modelo SK uma série de vantagens, dentre elas a mais importante é a elevada potência transmitida na usinagem [WECK, 1993-2]. Devem ser mencionados, em especial, a pequena massa e o pequeno comprimento total, a elevada rigidez e a melhor capacidade de transmissão de momentos, a reprodutibilidade e precisão do posicionamento axial, uma força de desbloqueio definida, e a qualificação essencial para rotações mais elevadas quando comparado com o tipo SK.

As ferramentas de topo até agora empregadas na indústria moveleira são quase que exclusivamente ferramenta de haste cilíndrica. Eles são interligados por meio de um mandril com o eixo da árvore. Frequentemente, são empregados fixações por pinça. Permitem um limite de transmissão de momento e formas finais que anteriormente não eram possíveis. Para elevadas rotações, eles podem suportar somente cargas pequenas em função da expansão dos cones externos [SCHULZ, 1989]. Uma fixação melhor e mais segura é possibilitado pelos sistemas de fixação hidráulica.

2.2.5. SISTEMA DE FIXAÇÃO DA PEÇA

Um dos aspectos de maior importância e, frequentemente, de maior dificuldade na usinagem de madeiras maciças é a fixação das peças na máquina-ferramenta para a execução da operação de usinagem, já que a mesma é fonte primária de erros, para a obtenção de peças com elevada qualidade de forma.

A fixação de uma peça durante a usinagem de madeira maciça tem duas importantes tarefas a cumprir. A superfície de fixação tem usualmente a função de superfície de referência e de garantir o posicionamento da peça sob a ação de forças de processo. Nestas duas funções, a

fixação pode exercer uma grande influência sobre o resultado final de trabalho. Dentre os diferentes tipos de fixação existentes, o mais empregado no fresamento de madeira maciça é a fixação por vácuo.

2.3. FERRAMENTA

2.3.1. ASPECTOS GERAIS

Nos últimos anos, a introdução de máquinas de desbaste CNC com altas velocidades tem intensificado o potencial da produção em torno de quatro ou cinco vezes quando comparados com o equipamento anterior [WADKIN, 1994].

Um ciclo de usinagem, geralmente, apresenta as seguintes fases [FERRARESI, 1970, PALLEROSI, 1972; FERREIRA, 1992]:

1. Transporte, posicionamento, fixação da peça em bruto ou semi-acabada na máquina-ferramenta e acionamento dos comandos para a partida da máquina;
2. Aproximação e/ou posicionamento das ferramentas para o início do corte, mudança da rotação ou avanço;
3. Operações de corte pelas ferramentas;
4. Afastamentos e/ou posicionamentos das ferramentas nas suas posições iniciais;
5. Inspeção da peça;
6. Inspeção e ajustagem periódica das ferramentas;
7. Reposição das ferramentas que não mais satisfazem as condições desejadas na peça ou ferramenta (troca e ajustagem inicial). Nas operações de desbastes tem-se como delimitante a possibilidade da perda da capacidade de corte ou quebra das ferramentas. Na operações de acabamento os fatores delimitantes são, principalmente, as tolerâncias dimensionais e a rugosidade;
8. Acionamento dos comandos para a parada da máquina, desfixação, transporte e posicionamento da peça acabada; e,
9. Preparo da máquina-ferramenta para a execução de N peças, que só ocorre no início da mesma.

Procedendo-se uma análise a respeito do ciclo de usinagem percebe-se a importância da seleção do material e da geometria de cada ferramenta de corte, do sistema de fixação da ferramenta e das condições de usinagem para cada tipo de madeira ou derivado no processo de fresamento, principalmente, quando se deseja obter a melhoria do acabamento superficial e o aumento da produtividade.

Existe interesse permanente por parte dos fabricantes de ferramentas em produzir ferramentas que tragam bons resultados em usinagem em altas velocidades de madeiras e seus compostos, pois existe uma falta expressiva de dados relativos à vida da ferramenta e do entendimento sobre os mecanismos de desgaste envolvidos, sobretudo para várias combinações ferramenta-peça.

2.3.2. CONCEPÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A concepção das ferramentas de corte tem uma importância capital. Sua vida e a qualidade das superfícies usinadas dependem de sua rigidez e de seu comportamento vibratório.

As ferramentas, podem, segundo citado por Stemmer, [STEMMER, 1995], ser inteiriças, calçadas ou com dentes postiços.

- Ferramentas inteiriças: A concepção destas ferramentas é primordial para a qualidade e a rentabilidade da usinagem. O reforço do corpo tem um efeito maior sobre o comportamento das ferramentas longas. Uma forma tronco cônica melhora a rigidez e, portanto, o comportamento vibratório.
- Ferramentas com pastilhas intercambiáveis: são fresas constituídas de um corpo (cabeçote) de aço em cujos dentes são fixados mecanicamente ou brasadas pastilhas de corte (aço rápido, metal duro, cerâmica, diamante policristalino, etc.). A vantagem é que o corpo da fresa é feito de material mais barato (aço carbono, aço forjado de liga, aço fundido ou ferro fundido de alta resistência), que pode ser reaproveitado após o desgaste dos gumes. As pastilhas (de metal duro, de metal duro revestido, cerâmica, CBN ou diamante policristalino) tem gumes apropriados para o corte em seus vários lados e, muitas vezes, de ambos os lados da pastilha, ou ao redor de uma circunferência, no caso de pastilhas redondas. Estas fresas são otimizadas para o acabamento de alta precisão, porque a afiação se faz com as pastilhas montadas, eliminando erros cumulativos associados com pastilhas indexáveis. No caso de

desgaste, a pastilha é indexada, girada ou reposicionada, de modo a oferecer um gume para a operação de corte.

- Ferramentas com cassetes: São fresas constituídas de um corpo de aço rápido, no qual são montados os dentes postiços, quer inteiriços de aço rápido, quer constituídos de uma haste (cabo) com pastilha de metal duro (ou outro material de corte) brasada ou fixada mecanicamente. O sistema permite utilizar os mais variados tipos de cassetes indexáveis, nos mais diferentes tamanhos e geometrias. Há possibilidade de ajuste de posição dos gumes e fácil troca de gumes danificados.

É importante verificar a estabilidade das fixações mecânicas em operações de fresamento em altas velocidades. Para os pequenos diâmetros somente a fixação por brasagem é possível [BAGARD, 1995].

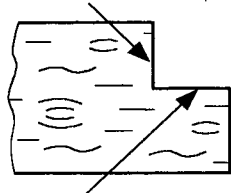
2.3.3. GEOMETRIA DA FERRAMENTA

A geometria das fresas possui uma grande influência sobre o acabamento superficial desejado e sobre o fim de vida da ferramenta. Por isso são bastante significativas as investigações com o objetivo de otimizá-las. A experiência mostra, que dependente de outras grandezas do processo, em regra, a geometria da ferramenta é uma necessidade de ajuste. As mais importantes grandezas para descrever as dimensões e ângulos da ferramenta estão mostradas na **Figura 3**. As notações foram empregadas segundo as normas /DIN6581/, ISO3002-1 e SALJÉ,1983/. Para o fresamento de metais são freqüentemente utilizadas as notações segundo Kronnenberg, 1963.

Os ângulos de saída γ , de cunha β e de incidência α possuem uma grande influência sobre o resultado do processo. A soma desses três ângulos será sempre 90° . Quando medidos no plano ortogonal da ferramenta receberão o índice “ 0 ”. Por outro lado, quando medidos no plano normal ao gume principal, recebem o índice “ n ”. No plano ortogonal situa-se o gume principal. As grandezas mais importantes para a definição dos ângulos acima citados são os materiais da ferramenta e da peça. A seleção do material da ferramenta implicará na capacidade máxima de carga que o gume poderá suportar durante a solicitação pretendida no material da peça.

A força passiva é diretamente influenciada pelo ângulo de inclinação do gume principal (κ_r, λ), que pode, por exemplo, implicar no aumento da força de compressão sobre uma superfície revestida no fresamento periférico. Além disto, uma leve inclinação do gume causa um aumento na força de corte.

Fresamento periférico



Fresamento de topo

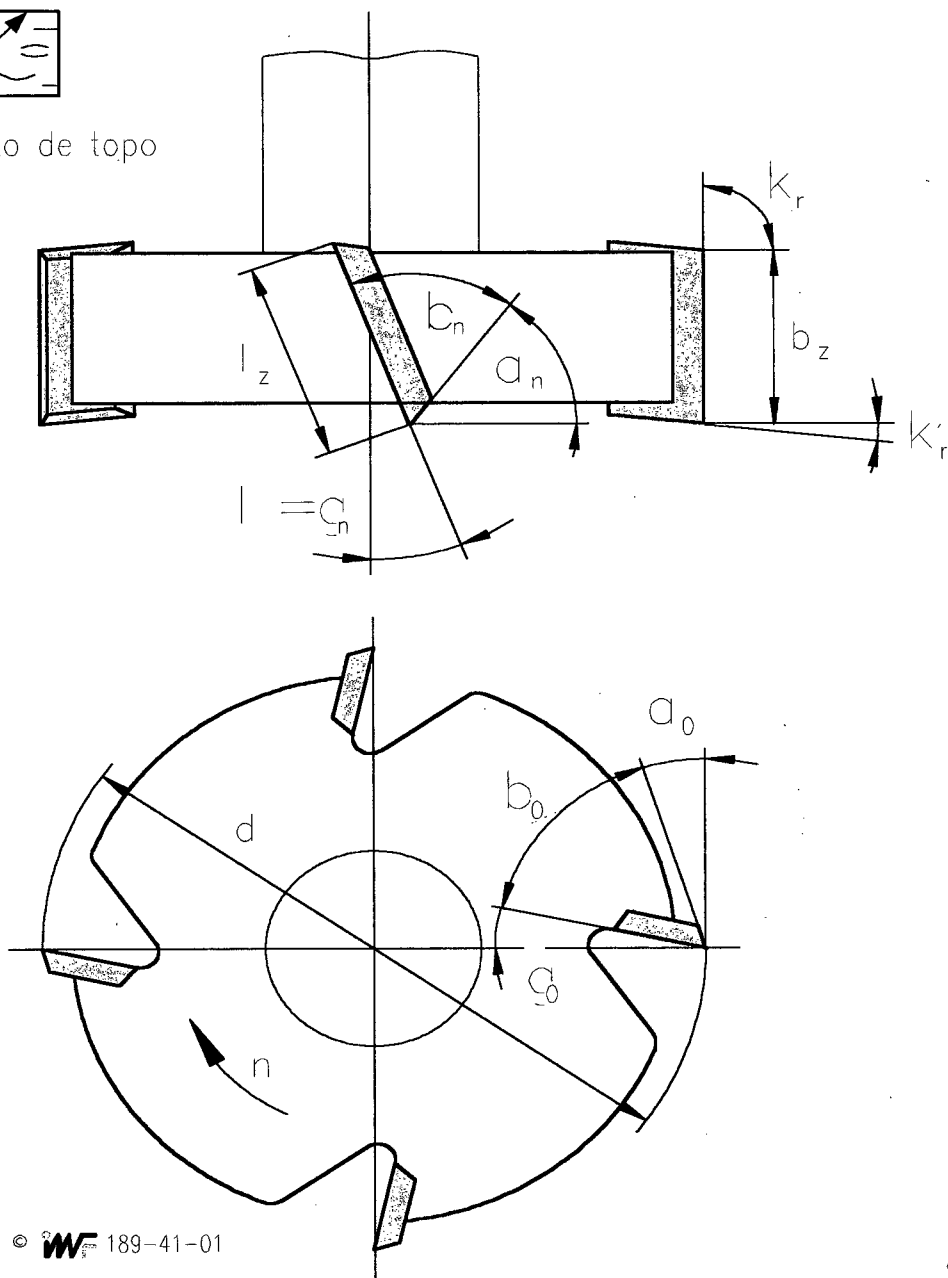


Figura 3 – Elementos geométricos de uma fresa.

Na prática, geralmente, esse efeito é insignificante, pois o ângulo do gume da fresa, que na rotação da ferramenta não gera um cilindro, mas origina uma trajetória em forma de hipérbole [SALJÉ, 1986]. Isso provoca na superfície da peça uma leve convexidade. Essa convexidade denominada de abaulamento B pode ser calculado como a seguir:

$$B = \frac{d}{2} - \sqrt{\left[\frac{d^2}{4} - \left(\frac{S_w}{2} - \tan \lambda \right) \right]} \quad (1)$$

2.3.4. MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE

As exigências feitas a um material de corte segundo Könnig [KOENIG, 1990] e também citados por Stemmer e Boehs [STEMMER, 1993, BOEHS, 1987] são:

- elevada dureza a frio bem superior a da peça a ser usinada,
- elevada dureza a quente,
- tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impactos,
- resistência à abrasão,
- estabilidade química, e
- facilidade de obtenção a preços econômicos.

Nenhum dos inúmeros materiais de corte disponíveis, atualmente, possui todas essas qualidades em conjunto. Se é extraordinário em algumas, apresenta-se inferior em outras. Desta forma, em cada trabalho específico, deve-se verificar quais as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a escolher o material de ferramenta mais adequado a cada caso conforme citado por Boehs [BOEHS, 1987].

As interrupções de corte no processo de fresamento significam solicitações térmicas e dinâmicas alternantes para a ferramenta, que eventualmente podem levar a formação de fissuras em forma de pente ou transversais e devido a fadiga pode levar a quebra do gume. Em decorrência disso, os materiais da ferramenta devem ter alta tenacidade, alta resistência a solicitações térmicas alternantes e alta resistência do gume.

O rápido desenvolvimento de novos materiais de ferramentas para atender todas essas exigências tem permitido o uso de novas tecnologias de usinagem, como o fresamento de madeiras e de seus compostos em altas velocidades de corte.

Para o fresamento de madeira e de seus compostos são importantes, em especial, a resistência do gume, resistência a abrasão, a resistência interna de ligação e um comportamento de desgaste reproduzível. As características exigidas para a usinagem de metais como, por exemplo, a resistência à quente e à oxidação, bem como pequena tendência para difusão e caldeamento tem importância secundária na usinagem de madeira .

Os materiais de corte podem ser agrupados em três grupos segundo Könnig [1990]: metálicos, compostos e cerâmicos. No primeiro grupo estão incluídos os aços rápidos e o Stellite, que ainda são freqüentemente empregados na indústria madeireira. Do segundo grupo fazem parte os metais duros e os Cermets. No terceiro grupo estão incluídos as cerâmicas, bem como materiais com base em diamante e nitreto de boro cúbico. Cerâmicas prestam-se muito pouco para a usinagem de madeiras e de seus compostos, pois são comparativamente frágeis, e a sua vantagem principal na usinagem de metais, a relativa a resistência térmica não se faz necessária na usinagem de madeira. Ferramentas com base em Nitreto de boro cúbico apresentam aproximadamente o mesmo preço que ferramentas de diamante policristalino, mas em decorrência da menor dureza e a instabilidade química, quando em contato com o vapor d'água, não são empregadas na usinagem de madeiras.

Materiais para ferramenta metálicos: As principais vantagens dos aços rápidos (HSS – High Speed Steel) são a elevada resistência a flexão (até 3800 N/mm) e respectiva tenacidade, bem como seus moderados preços. O HSS é empregado, em especial, para a fabricação de ponta única, bem como para ferramentas com gume muito vivos e pequenos ângulos de cunha. Porém, os aços rápidos não são resistentes ao desgaste e apresentam uma dureza relativamente baixa para materiais de ferramentas de corte, que varia entre 60 a 70 HRC.

O aço-rápido, mesmo revestido, não está adequado à usinagem em altas velocidades. Seu módulo de Young, relativamente baixo favorece as flexões e as vibrações, afetando, assim, a precisão e o estado da superfície, principalmente, para ferramentas de pequenos diâmetros. Entretanto, resiste bem aos choques, o que justifica sua utilização em condições difíceis, mas a baixas velocidades [BAGARD, 1995].

Na usinagem de madeiras podem ser empregadas ligas metálicas não ferrosas com matrizes austeníticas com base de cobalto-cromo-carbono, que é denominada de *STELLITE*.

Segundo um fabricante de ferramentas de stellite [Fa. Uddeholm], a principal vantagem oferecida pelo *stellites* é a possibilidade de soldá-la sobre um corpo de aço. Isto só é possível com base no teor de elementos ligantes. Outra vantagem é [SCHNNETKER e GORGES-FARIAS, 1998] a resistência ao desgaste abrasivo no serramento de madeiras. Além disso, a dureza a frio é superior àquela dos aços de baixa liga, aproximando-se dos aços rápidos e de conservarem essa dureza até temperaturas superiores as dos aços rápidos.

Materiais cerâmicos com ligantes metálicos: Neste Grupo encontra-se os metais duros e Cermets, que apresentam parcialmente características de metais e de cerâmicos. Ambos

materiais possuem estruturas semelhantes. Eles são produzidos através do processo de metalurgia do pó. São constituídos de um ligante, onde estão assentados os carbonetos. A função do ligante é constituir a ligação dos carbonetos frágeis, formando um corpo relativamente resistente, ao passo que os carbonetos oferecem uma alta resistência ao desgaste e à quente.

Pela mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligante tem-se a possibilidade de se conseguir propriedades distintas nos “**metais duros**” e “**Cermets**” .

Na indústria madeireira, são empregados os metais duros do tipo K /DIN 4990/ em função de sua elevada dureza, resistência ao desgaste, bem como a sua suficiente resistência a flexão, que atendem bem as exigências das diferentes tarefas de fresamento em alta velocidade de madeira e de seus compostos. Os metais duros deste grupo K se compõem, quase que exclusivamente, de WC e de Co, como elemento ligante. Pequenas percentagens de VC, TiC, TaC e NbC são acrescentadas as vezes para melhorar certas características. Os metais duros são fabricados em diversos graus, correspondendo a uma dureza decrescente e uma tenacidade crescente e vice-versa. Os tipos mais duros são usados em usinagem em altas velocidades, por possuírem um menor teor de cobalto.

O metal duro apresenta bom desempenho, tanto no corte de madeira verde como no corte de madeira seca, porém o mesmo depende de seu ligante, que deve ser inerte ao ataque químico dos extratos da madeira. O tamanho dos grãos de carboneto de tungstênio também têm influência no desempenho. Grãos de dimensões menores melhoram o desempenho das ferramentas no fresamento de madeira verde. A boretação de pastilhas de metal duro tem apresentado bons resultados, pois conduzem melhor o calor e melhoram o desempenho ou a vida da ferramenta [GOTTLOB, 1991].

A utilização de pastilhas de **cermet** está bem difundida em operações de torneamento e faceamento. O cermet tem boa capacidade de corte e suporta avanços muito pequenos. Enfim, adapta-se bem às velocidades elevadas de corte. Suporta mal, porém o fresamento concordante, os choques, as vibrações e não se presta muito ao fresamento de cavidades, pois a ferramenta se desgasta irregularmente por escamação. O cermet é também de difícil afiação e reafiação. As ferramentas inteiriças são, conseqüentemente, mais caras (50% a 100%) e não existem mais na forma tronco-cônica – daí o comportamento vibratório acentuado, particularmente nos pequenos diâmetros. A utilização de ferramentas de cermet inteiriço se limita, então, aos casos onde o corte é discordante e regular. Os resultados são, neste caso, excelentes (exatamente, como para algumas variações de pastilhas intercambiáveis, em desbaste e a alta velocidade) [BAGARD, 1995]. Este material possui um forte potencial e é necessário acompanhar os progressos na área.

Materiais Cerâmicos para ferramentas de corte: Os materiais cerâmicos são classificados de acordo com a sua composição em grupos de cerâmicas óxidas, que possuem óxido de alumínio (Al_2O_3), e não óxidas, geralmente com base de nitrido de silício (Si_3N_4). Elas se mostram através de elevada dureza a quente e estabilidade química. A desvantagem é a elevada dureza, que é a causa das ocorrências de fratura.

Durante muitos anos as ferramentas cerâmicas não tiveram o sucesso industrial esperado. Isto se deve em parte ao fato de que as cerâmicas exigiam máquinas-ferramentas de elevada velocidade, grande potência e extrema rigidez. Além disso, a alta velocidade de corte implicava num fluxo intenso de cavacos (pó, serragem), tornando imprescindível sua eficiente remoção e uma proteção adequada ao operador. As ferramentas de material cerâmico apresentam um desgaste maior que as ferramentas de metal duro no fresamento de madeiras, sendo que a sua velocidade de desgaste aumenta com a velocidade de corte.

Investigações realizadas por STÜHMEIER, 1989, mostraram, para o processo de fresamento de compostos de madeira (chapas de aglomerado e de MDF), que com o emprego de cerâmicas obteve-se percursos usinados semelhantes para ferramentas de metal duro. Como metal duro é mais barato que a cerâmica, na usinagem de madeiras não serão utilizadas as ferramentas de cerâmica.

Ainda em outra categoria das cerâmicas não metálicas e anorgânicas estão incluídos também o diamante e o nitreto de boro cúbico.

Uma grande área do emprego das ferramentas de diamante policristalino é a usinagem de madeiras. Ele se sobressai na usinagem em altíssimas velocidades. Não só servem para acabamento, mas também para operações de desbaste. O diamante é o material mais duro que se conhece. As pastilhas de diamante policristalino tem sido produzido com partículas de diamante por sintetização com orientação anisotrópica. Estas são fresadas em pastilhas de carboneto de tungstênio. O diamante policristalino é denominado de material superduro (ultrahard). Ferramentas de diamante policristalino são geralmente mais econômicas que o equivalente aço rápido ou ferramentas de carboneto quando grandes lotes de componentes de madeira devem ser fresados [WALTZ, 1994]. As três maiores vantagens das ferramentas de corte de PKD, em produção em série, são o aumento da vida da ferramenta, a elevação da produtividade e diminuição dos custos [LACH, 1994]. Devido a presença de partículas ferrosas que podem aparecer no trabalho em madeira, a velocidade de corte atingida com ferramentas de diamante freqüentemente é fortemente limitada; além disso, o gume das ferramentas torna-se cego rapidamente necessitando de constante afiação. O custo do tempo de parada para troca das

ferramentas pode ser significativo se são usadas máquinas-ferramentas automáticas [WALTZ, 1994]. A utilização de um detetor de metais compacto, que pode ser facilmente instalado em máquinas-ferramentas para usinagem de madeiras pode solucionar este tipo de problema, pois monitora a peça de madeira interrompendo o avanço caso haja a presença de partículas metálicas [LACH, 1994].

No caso do MDF (Medium Density Fiberboard) que oferece vantagens distintas na fabricação e é considerado o substituto natural da madeira natural, pois pode ser utilizado na fabricação de componentes de móveis como, por exemplo, em portas e painéis. O MDF possui densidade em torno de 700 kg/m^3 , é resistente a fratura e entretanto é altamente abrasivo. Assim, o uso de ferramentas convencionais significa tempos de produção elevados em função do desgaste excessivo das ferramentas. Com a utilização da ferramenta de PKD consegue-se uma solução econômica devido ao aumento da produção, redução dos tempos de parada, produtos de ótima qualidade e custos de ferramenta por peça mais atrativos [Fa. Elisabeth Ann, 1994].

Entende-se que a ferramenta de diamante policristalino (PKD) não é a solução para todos os problemas no fresamento de madeiras, entretanto, a cada dia, comprova-se sua aplicação como solução econômica para materiais de difícil usinabilidade e para a produção em massa.

Ferramentas de corte com revestimento: As ferramentas revestidas na indústria metal-mecânica tem alcançado uma grande fatia do mercado. Sobre substratos de aço rápido ou metal duro são aplicados uma fina camada de material resistente ao desgaste com uma granulometria extremamente fina, que em parte consta de carbonetos, nitretos, carbonitretos ou óxidos. O objetivo é aproveitar as boas características dos materiais de revestimento como, por exemplo, a resistência ao desgaste.

As ferramentas revestidas não puderam até agora ser empregadas com sucesso na usinagem de madeiras e de seus compostos, onde se exigem gumes vivos.

Atualmente, os materiais de ferramenta mais utilizados para o fresamento de madeira e de seus compostos em altas velocidades são em primeiro lugar o metal duro seguido pelo diamante policristalino.

2.4. CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA PARA FINS INDUSTRIAIS

2.4.1. GENERALIDADES

O emprego de madeiras para fins industriais é fundamentalmente determinada pela anatomia da madeira. O parâmetro decisivo de qualidade da madeira no setor moveleiro, a textura superficial, que ao contrário dos metais e dos demais materiais plásticos, pode ser reconhecida pela sua estrutura macroscópica.

A anatomia da madeira é o estudo dos diversos tipos de células que constituem o lenho (xilema secundário), suas funções e peculiaridades estruturais associados a caracterização tecnológica das madeiras, que permitem, segundo BURGER (1991), SOUZA (1997) e NIEMZ (1993), atender os seguintes objetivos:

- conhecer a madeira visando o emprego correto;
- identificar as espécies;
- distinguir madeiras aparentemente idênticas;
- prever utilizações adequadas de acordo com as características anatômicas da madeira;
- prever e compreender o comportamento da madeira no que diz respeito a sua utilização;
- ampliar a comercialização de espécies pouco conhecidas no mercado nacional e internacional;
- contribuir para ampliar a viabilidade econômica do manejo florestal sustentável e, em consequência, sua maior utilização; e,
- ampliar o emprego da madeira, a partir de indicadores técnicos e do conhecimento de suas reais possibilidades de uso, que proporcionará a automática agregação de valor aos seus produtos.

Com o decorrer dos avanços tecnológicos, as formas de emprego da madeira tornaram-se os mais diversos e aperfeiçoados por ser um material de disponibilidade quase que universal.

Mesmo com o surgimento de inúmeros materiais sintéticos tem sido difícil manter um alto padrão de conforto sem a presença da madeira. Surgiram outros tipos de materiais como

metais, polímeros, cimento, etc., no entanto, apresentam indisponibilidade de matéria-prima, alta necessidade de insumos energéticos para a sua produção, além de problemas de contaminação ambiental causados tanto no processo de produção como no de descarte [ARRUDA, 1995].

A madeira possui características peculiares que podem torná-la um material imprescindível em um grande número de situações. FUSCO [1989] define como as seguintes as vantagens da madeira:

- é o único material renovável;
- a produção de madeira não é solvente;
- possui baixo consumo energético para a sua produção;
- foi o primeiro material empregado capaz de resistir tanto a esforços de compressão como de tração;
- permite fáceis ligações e emendas, em consequência apresenta facilidade de montagem e substituição de peças;
- a característica de resistência permite absorver choques que romperiam ou provocariam fendas em outros materiais;
- apresenta excelentes propriedades isolantes (térmicas, acústicas e elétricas); e,
- possui características estéticas muito boas.

Entretanto, a madeira apresenta algumas peculiaridades, que devem ser levadas em consideração, principalmente nos trabalhos científicos, pois é um material fundamentalmente heterogêneo, anisotrópico, assimétrico, e biologicamente perecível.

A heterogeneidade e a assimetria são caracterizadas por ser um material constituído por células dispostas e organizadas em diferentes direções, onde o aspecto da madeira varia de acordo com a face observada. Para estudos anatômicos e pesquisas científicas, adotam-se os seguintes planos convencionais de corte:

- de topo (X): perpendicular ao eixo da árvore;
- longitudinal radial (R) ou transversal: paralelo aos raios ou perpendiculares aos anéis de crescimento;
- longitudinal tangencial (T): tangenciando os anéis de crescimento, ou perpendicular aos raios.

Além da aparência, também o comportamento mecânico da madeira difere em cada um destes três sentidos, fenômeno conhecido como anisotropia, que é típico para a madeira maciça.

A madeira maciça serrada pode ser classificada segundo a forma de separação, que pode ser somente através dos cortes transversal e longitudinal tangencial. Ainda pode ser diferenciada em madeira não tratada ou tratada como, por exemplo, pelo tratamento de impregnação superficial, médio e profundo para aumentar a durabilidade natural da madeira contra os agentes destruidores bióticos e abióticos.

Os compostos ou derivados de madeira podem ser subdivididos em produtos de chapas de madeira como, por exemplo, chapas de aglomerado (Particleboard / Spanplatte), de MDF (Medium Density Fiberboard) ou OSB (Oriented Strand Board), chapa dura (Hardboard / Faserhartplatte) e de compensado (Plywood).

Outro emprego ainda da madeira é na forma de lâminas. A textura da raiz das árvores adquiriu atualmente um elevado valor comercial.

As árvores comercialmente importantes são classificadas em dois grupos:

- GIMNOSPERMAS (Coníferas), também denominadas de folhas perenes ou madeiras menos densas, e
- ANGIOSPERMAS (Dicotiledôneas), também chamadas de folhosas ou madeiras densas.

A terminologia mais comum é madeira menos densa e madeira mais densa. Isto, entretanto, é enganoso porque várias vezes espécies de coníferas são, na realidade, mais densas do que muitas das dicotiledôneas.

A anisotropia da madeira, inerente a sua origem biológica, confere resistências nas diferentes direções relativas a posição das fibras, ou seja, apresenta diferentes propriedades físico-mecânicas dependendo da direção que se considera.

Portanto, distinções entre os dois grupos baseados em características anatômicas são mais precisas. Grandes limitações práticas da madeira são a sua heterogeneidade, anisotropia e variabilidade. Nem mesmo dois pedaços de madeira de uma mesma espécie são absolutamente iguais. Estas diferenças podem ser atribuídas as condições ecológicas do local onde o vegetal cresce, à localização da amostra no tronco (altura, distância da medula, posição do anel de crescimento) aos defeitos da madeira, etc.

A composição do lenho, a estrutura e a organização de seus elementos constituintes são os fatores que determinam as propriedades físicas e mecânicas da madeira e a sua aptidão para o uso comercial.

A constituição estrutural da madeira e dos seus compostos é, portanto, fundamental para a caracterização tanto do emprego quanto da usinabilidade. Se diferencia a estrutura entre macroscópica, microscópica e submicroscópica. Sendo ainda a composição química importante para o entendimento de sua caracterização.

2.4.2. ESTRUTURA SUBMICROSCÓPICA

As três principais funções da madeira em uma árvore são: a condução de líquidos; a transformação, armazenamento e transporte de substâncias nutritivas; e, a sustentação do vegetal.

Estas atividades fisiológicas são desempenhadas por células especiais. As gimnospermas, que se originaram 150 milhões de anos antes que as angiospermas dicotiledôneas, possuem comparativamente uma estrutura bem mais simples e menos especializada que as angiospermas.

As **gimnospermas (Figura 4)** possuem quase que exclusivamente dois tipos de células, os *traqueídeos* (traqueídes) e as *parenquimáticas* (raios fusiformes) [KOLLMANN et alli, 1975].

Os traqueídeos são células alongadas (3 a 5 mm de comprimento) e estreitas (40 a 60 μm de diâmetro), de seção transversal vazada de forma quadrada ou sextavada com extremidades biseladas fechadas, que constituem quase que 90% do corpo das gimnospermas. Uma vez formados pelo câmbio, estes elementos celulares tem uma longevidade muito curta; perdem o conteúdo celular tornando-se tubos ocos de paredes lignificadas, que desempenham as funções de condução e sustentação no lenho. Os traqueídeos se diferenciam segundo a função, a posição e a direção entre os traqueídeos axiais, de lenho primaveril e de lenho tardio, situados longitudinalmente, e os traqueídeos radiais, que ocorrem associados aos raios, normalmente formando suas margem superior e inferior. Nas gminospermas, o lenho tardio é geralmente mais resistente, devido ao maior volume de material lenhoso nas paredes de suas células. A densidade, a dureza e a resistência mecânica são afetadas pela percentagem de lenho tardio no anel e pela regularidade na largura dos anéis de crescimento.

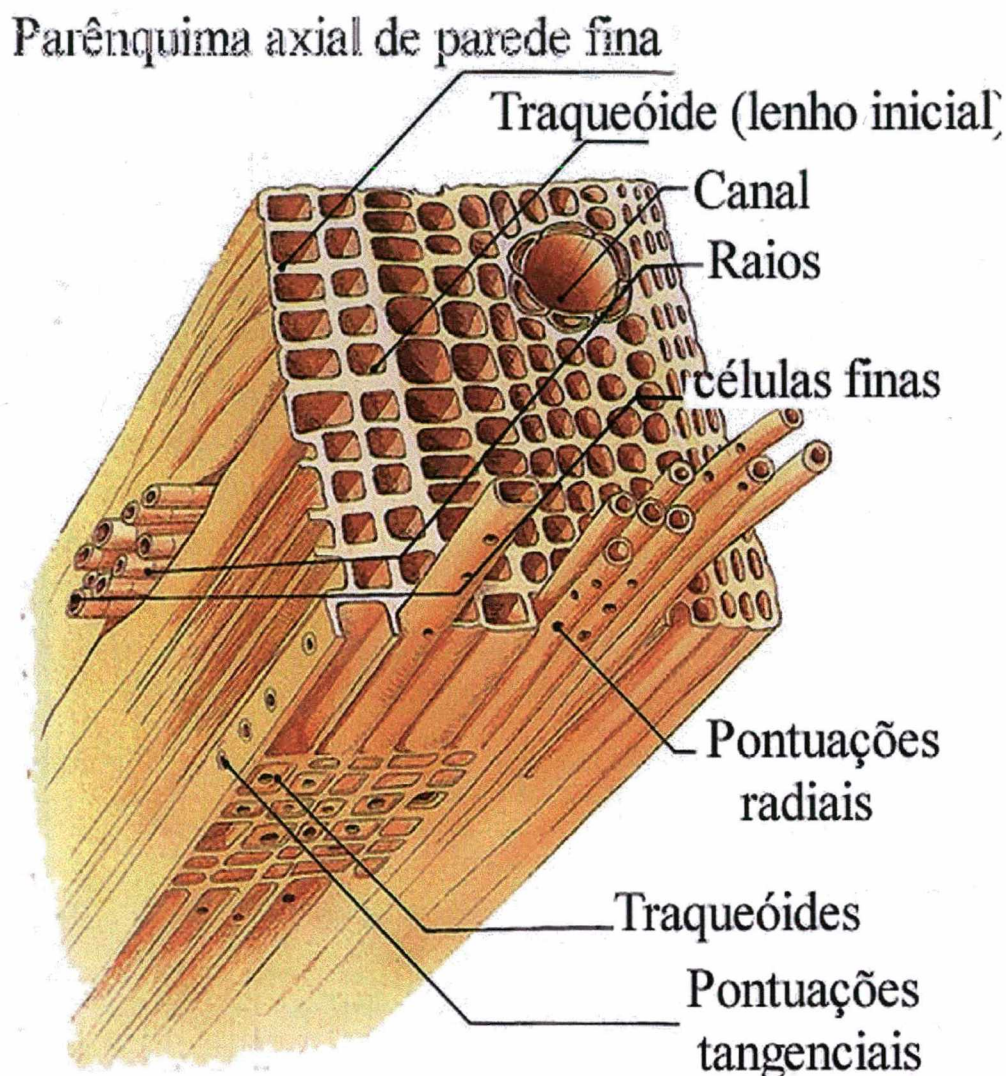


Figura 4 – Estrutura microscópica das **gimnospermas** [KOLLMANN].

Os parênquimas são conjuntos de células alongadas e achatadas, que se dispõem radialmente no lenho, em sentido perpendicular aos traqueídeos, em forma de fitas, da casca até o centro da árvore. As células dos raios se comunicam com os traqueídeos através de perfurações nas suas paredes designadas pelo seu aspecto como pontuações simples. Os raios constituem até 10% da madeira das gimnospermas. Sua função é armazenar, transformar e conduzir transversalmente substâncias nutritivas. Das 520 espécies de Gimnospermas existentes, cerca de 30 têm importância comercial.

A constituição anatômica das **angiospermas dicotiledôneas (Figura 5)**, bem mais evoluídas que as gimnospermas, apresenta uma elevada especialização e complexidade, oferecendo um número bem maior de caracteres para a sua identificação. Apresentam quatro elementos essenciais: vasos (poros), fibras, parênquima axial e raios (parênquimas transversal ou radial).

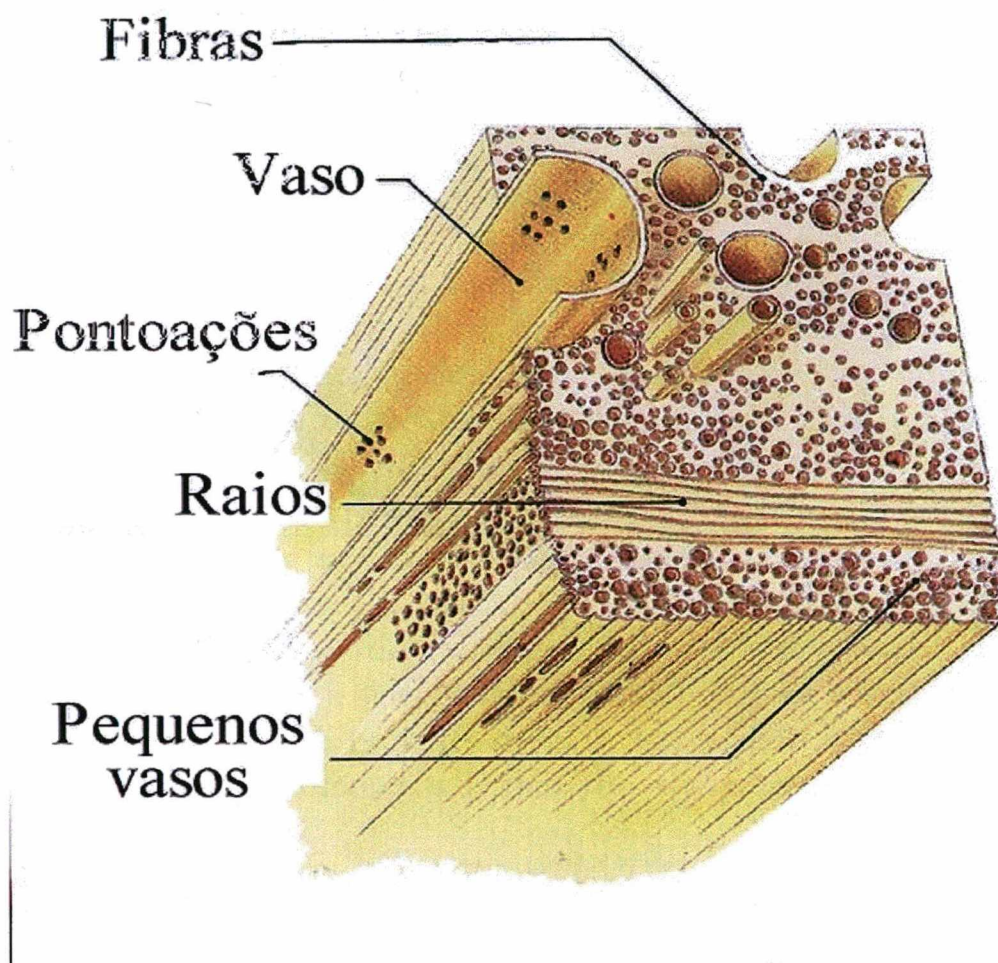


Figura 5 – Estrutura microscópica das **angiospermas dicotiledôneas** [segundo KOLLMANN].

Os vasos são células alongadas, com 0,2 a 2 mm de comprimento, 20 a 300 μm de diâmetro, seção transversal vazada e arredondada. Os vasos alinham-se mais que os traqueídeos e a comunicação entre as células é direta desaparecendo total ou parcialmente as extremidades celulares. Os vasos constituem de 20 a 30% da estrutura da madeira das gimnospermas. Tem como função a condução ascendente de líquidos na árvore.

Na seção transversal, os vasos são chamados de “poros” e podem ser arredondados, ovaladas ou poligonais. Os vasos devido a sua grande dimensão e as paredes delgadas são paredes fracas, e sua abundância, dimensão e distribuição influem na resistência mecânica da madeira. A distribuição dos poros pode ser regular ou muito irregular e é uma característica importante para a identificação de espécies e das propriedades tecnológicas da madeira (densidade, comportamento na secagem, diferentes resultados nos valores de rugosidade nos processos de remoção de cavaco, etc.). O tipo de porosidade da madeira é uma característica anatômica suscetível a variações provocadas pela adaptação da planta às condições ecológicas. Árvores que possuem densa folhagem e crescem em regiões de estações anuais bem definidas apresentam comumente porosidade em anel. O lenho com porosidade em anel (poros grandes acumulados no início do período vegetativo) é menos resistente a determinados esforços do que o lenho com porosidade difusa (poros distribuídos uniformemente ao longo do anel de crescimento). Se a distância entre os poros for muito grande, pode influenciar fortemente nos resultados da medição dos valores de rugosidade [SCHADOFFSKY, 1996].

As fibras são células peculiares a angiospermas, constituindo geralmente a maior porcentagem de seu lenho (20-80%), no qual normalmente desempenham a função de sustentação. As fibras são células longas, com 0,7 a 1,4 mm de comprimento, de seção transversal vazada e arredondada, paredes espessas e de extremidade afiladas. As fibras são classificadas em fibrotraqueídeos e fibras libriformes, que distinguem-se pelas pontoações: as *fibrotraqueídeos* possuem pontoações distintamente aeroladas e relativamente grandes (4-9µm), enquanto que as *fibras libriformes* possuem pontoações pequenas (2-4µm), inconspicuamente aeroladas, sendo também normalmente menores em comprimento e diâmetro.

Estas microfibrilas estão impregnadas de lignina e homocelulose; a homocelulose proporciona à madeira sua resistência a tração, por outro lado, a lignina lhe confere a dureza.

As fibras libriformes e fibrotraqueídeos são os elementos mais importantes no que diz respeito à resistência mecânica do lenho das dicotiledôneas. A estreita correlação entre volumes de fibras, densidade, resistência mecânica e trabalhabilidade é um fato experimentalmente comprovado [BURGER, 1991].

O parênquima axial é também um tecido fraco, cuja abundância (23-100% do volume total do lenho em dicotiledôneas) e distribuição, principalmente quando se apresenta formando amplas faixas contínuas, conferem as madeiras extraordinária leveza e pouca durabilidade natural, e podem reduzir consideravelmente a resistência mecânica da madeira.

Os raios (parênquima radial ou transversal) são conjuntos de células dispostos na madeira do câmbio até o centro, têm estrutura mais complexa e variada que os raios das gimnospermas; ligam-se aos vasos e as fibras através de pontuações simples e aeroladas. Têm como função: armazenamento, transformação e condução transversal de substâncias nutritivas. Os raios podem ser homogêneos e heterogêneos.

A relação entre os raios (parênquima radial) e a resistência mecânica do lenho é mais complexa pelo fato de que os lenhos com maior volume deste tecido são muito especializados e contêm um grande volume de fibras com paredes espessas, o que lhes confere elevada densidade. Entretanto, se duas espécies apresentam a mesma densidade, mas volumes distintos de parênquima radial, o lenho com maior quantidade deste tecido será o mais fraco. A fragilidade do tecido parenquimático dos raios é bem ilustrado pelas freqüentes rachaduras radiais que surgem no tronco com resultado de tensões internas de secagem.

A própria **estrutura submicroscópica** da parede celular reflete-se na resistência mecânica: quanto mais vertical for a orientação das microfibrilas de celulose, maior será a resistência à tração; quanto mais horizontal o seu grau de inclinação, maior será a resistência a esforços de compressão

2.4.3. ESTRUTURA MACROSCÓPICA

Em uma seção transversal de um tronco típico, com exceção do câmbio e em muitos casos os raios, as seguintes partes se destacam macroscopicamente (**Figura 4, Figura 5, e Figura 6**).

No centro do tronco encontra-se a *medula*. Sua função é armazenar substâncias nutritivas. Nas plantas jovens participa também na condução ascendente de líquidos. O seu tamanho, coloração e forma, principalmente nas angiospermas dicotiledôneas, são muito variáveis. É constituída por tecido parenquimático, portanto suscetível a apodrecimentos causados por fungos (toras ocas).

No sentido radial a medula estão os *raios*. São faixas horizontais de comprimento indeterminado formados por células parenquimáticas, que servem para armazenar e conduzir os nutrientes radialmente. Suas células apresentam uma longevidade maior em comparação com as outras células que compõem o lenho. Apresentam uma grande riqueza de detalhes e variações morfológicas, quando observadas nas seções longitudinais radial e tangencial, constituindo importantes elementos para a anatomia da madeira e identificação de espécies.

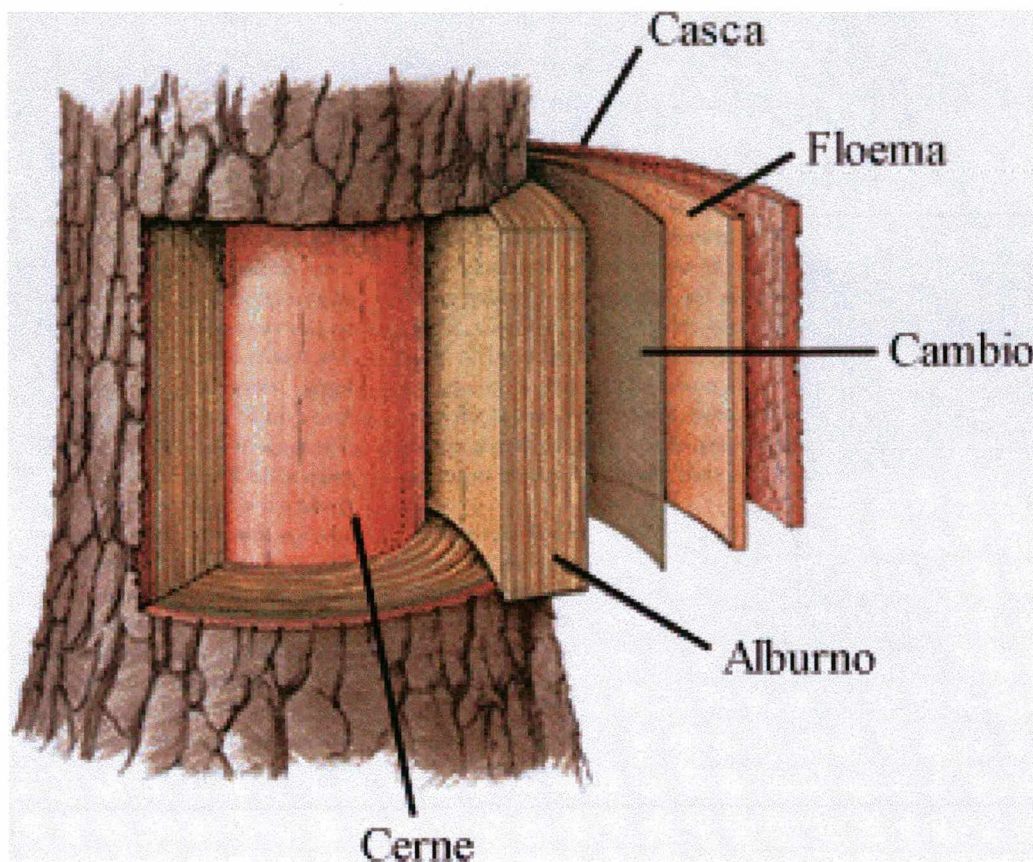


Figura 6 – Estrutura macroscópica da madeira [segundo KOLLMANN].

Na seqüência estão os *anéis de crescimento*. Em regiões caracterizadas por clima temperado, os anéis de crescimento representam habitualmente o incremento anual da árvore. Normalmente, a cada ano é acrescentado um novo anel ao tronco, razão por que são também denominados anéis anuais, cuja contagem permite conhecer a idade da árvore. Em um anel de crescimento típico distinguem-se normalmente duas partes: o lenho inicial (lenho primaveril) e o lenho tardio (lenho estacional ou estival). O lenho inicial corresponde ao crescimento da árvore no início do período vegetativo, normalmente primavera, quando as plantas despertam do período de dormência em que se encontravam, reassumindo suas atividades fisiológicas com todo o vigor. As células da madeira formadas nesta ocasião caracterizam-se por suas paredes finas e lumes grandes, que lhe conferem em conjunto uma coloração clara. Com a aproximação do fim do período vegetativo, normalmente outono, as células vão diminuindo paulatinamente sua atividade fisiológica. Em consequência deste fato, suas paredes vão se tornando

gradualmente mais espessas e seus lumes menores, distinguindo-se do lenho anterior por apresentarem em conjunto uma tonalidade mais escura. É esta alternância de cores que evidencia os anéis de crescimento de muitas espécies. Para muitas árvores tropicais, os anéis correspondem a períodos de chuva e períodos de seca, queda de folhas e/ou simplesmente dormência, podendo ocorrer dois ou mais ciclos em um ano. Anéis de crescimento não são, portanto, necessariamente anuais! Lenho tardio e primaveril apresentam uma grande diferença de densidade e dureza. Consequentemente, as forças de usinagem e os valores de rugosidade podem ser fortemente influenciados.

Como *cerne* é identificado a parte interna da madeira. Em muitas árvores, a parte interna do tronco se destaca por sua cor mais escura. A causa da formação do cerne deve-se ao fato de que, com exceção das células parenquimáticas que apresentam maior longevidade e permanecem vivas até certa distância para o interior do tronco (alburno), apenas suas camadas mais periféricas são fisiologicamente ativas: o fluxo ascendente de líquidos retirados do solo ocorre nos anéis de crescimento mais externos do xilema, o transporte da seiva elaborada se dá no floema e, finalmente, a formação de novas células é realizada pelo câmbio. Assim a medida que a árvore cresce, as partes internas distanciam-se do câmbio, perdem gradativamente sua atividade vital e adquirem coloração mais escura em decorrência da deposição de tanino, resinas, gorduras, carboidratos e outras substâncias resultantes da transformação dos materiais de reserva contidos nas células parenquimáticas do alburno interno. As principais diferenças entre o cerne o alburno são: o cerne é mais escuro; apresenta menor teor de umidade devido à redução da atividade fisiológica; é mais resistente ao ataque de agentes xilófagos e degradadores; e, o cerne é menos permeável, secando e recebendo soluções preservativas com maior dificuldade.

Os elementos do tronco mais externos que compõem a casca como, por exemplo, o floema (anel interno vivo) e o ritidoma (anel externo não vivo) não apresentam interesse para o processo de usinagem de madeira com remoção de cavaco.

2.4.4. PROPRIEDADES ORGANOLÉPTICAS DA MADEIRA

A densidade (massa específica) é a propriedade física mais importante na caracterização tecnológica da madeira para os mais diversos fins, principalmente para o setor moveleiro e a construção civil, já que a variação da densidade básica afetará a resistência mecânica da madeira, o grau de instabilidade dimensional pela perda ou absorção de água, etc. [BURGER, 1991; SZÜCS, 1996; KOLLMANN, 1984].

A densidade varia de acordo com vários fatores: cerne, alburno, lenho inicial, lenho tardio e, sobretudo, com o teor de umidade. Portanto uma comparação, para ser válida, deve ser feita nas mesmas condições.

A densidade (ρ) em $[\text{Kg/m}^3]$ é a relação entre a massa (m) e o volume (V). É dado por:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

A variação natural de massa em madeiras de iguais dimensões reflete a quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou a quantidade de espaços vazios nelas existentes (sendo que a presença de incrustações e conteúdos como gomo-resinas, cristais, sílica, etc., quando em grande quantidade, também podem aumentar o peso da madeira). Como a composição anatômica (detalhes celulares, arranjo e percentagem de diversos tecidos componentes do lenho) é peculiar a cada espécie, a densidade da matéria lenhosa, denominada densidade real (ρ_r), apresenta uma variação natural entre $(1400-1620) \text{ kg/m}^3$. Entretanto, devido a variação nas dimensões e proporções dos diversos tecidos lenhosos, a densidade básica (ρ_u) das madeiras maciças determinada para valores de umidade a 12% varia entre $(130-1400) \text{ kg/m}^3$.

O grau de resistência mecânica que se pode deduzir da densidade é, no entanto, altamente modificado pela estrutura histológica, que se manifesta no comprimento, espessura das membranas, quantidade de pontoações nas paredes, etc.

A dureza é uma propriedade mecânica intimamente associada à densidade, contribuindo também para a distinção das espécies.

A grã da madeira também influencia na sua resistência a esforços mecânicos. Peças com grã oblíqua, por exemplo, rompem-se ao longo da direção da inclinação quando submetidas a esforços.

2.4.5. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A madeira é composta de substâncias químicas orgânicas, originalmente produzidas pelos elementos anatômicos ativos da árvore, perto do câmbio. Na época do corte, entretanto, a maior parte da árvore não é de elementos anatômicos ativos. Em consequência, substâncias normalmente associadas aos elementos ativos, tal como proteínas e outros materiais nitrogenados, estão praticamente ausentes na madeira. A composição da madeira é de aproximadamente 50% carbono, 6% hidrogênio e 44% oxigênio, com um teor de cinza de 0,2 a 0,3% e nitrogênio de 0,1% ou menos [BODIG E JAYNE, 1982]. O teor de cinza é um indicador

dos constituintes minerais, que são, principalmente, cálcio, magnésio, carbonatos, óxidos e, ocasionalmente, cristais e sílica.

Cristais e depósitos de sílica, especialmente estes últimos, têm grande importância na avaliação das características de usinabilidade da madeira e consequentemente no seu emprego. Um elevado teor de sílica, substância que apresenta elevadíssimo grau de dureza, pode tornar antieconômica a conversão de toras em madeira serrada, devido ao seu efeito abrasivo sobre os dentes das serras e equipamentos. No processos de transformação da madeira em produtos pode provocar um elevado desgaste ou até mesmo a quebra da ferramenta de corte e, ainda, provocar danos nas máquinas-ferramentas.

Cristais são depósitos, em sua grande maioria, de sais de cálcio, especialmente oxalato de cálcio, que se encontram principalmente em células parenquimáticas. Sua presença é bastante rara em gminospermas, mas comum em angiospermas, que é o caso das espécies aqui estudadas.

A sílica é um material cuja fórmula química e grau de dureza assemelham-se aos do diamante. Pode ocorrer no interior das células em forma de partículas ou grãos, normalmente nos raios e parênquima axial e, em casos mais raros, nos outros elementos verticais (fibras). Outra forma de ocorrência, é em blocos compactos (*dense of vitreous silica*) nos lumes dos elementos verticais, sobretudo fibras e vasos, e raramente em células parenquimáticas.

Além dos cristais e sílicas, podem ocorrer nas madeiras muitas outras substâncias orgânicas (compostos fenólicos) e inorgânicos (carbonatos, sulfato de cálcio).

Os constituintes orgânicos da madeira podem ser classificados como componentes das paredes dos elementos anatômicos, e substâncias estranhas, chamadas extratos.

Os componentes da parede dos elementos anatômicos são os membros estruturais da madeira e determinam predominantemente as propriedades físicas da madeira.

Os extratos estão presentes na parede dos elementos anatômicos ou em estruturas anatômicas especializadas, tal como vasos condutores e canais resiníferos. Embora não abundantes, os extratos às vezes afetam o peso específico (densidade), por isso afetam indiretamente certas propriedades físicas relacionadas como, por exemplo, a dureza. A dureza é uma característica que pode constituir-se em fator limitante para o emprego da madeira em movelaria e construção civil (CALLORI, 1997).

Os componentes da parede dos elementos anatômicos podem ser classificados ou como carboidratos ou fenóis. Todos os carboidratos são essencialmente polímeros lineares

(polissacarídeos), cerca de 75% da substância da madeira. A maioria dos fenóis são lignina, uma substância polímera tridimensional e complexa. A estrutura molecular da lignina ainda não é completamente entendida. Quando uma amostra de madeira é deslignificada em condições que retém os carboidratos praticamente inalterados, o produto será a *holocelulose*. Esta deslignificação é diferente da maceração química, na qual a remoção da lignina raramente é completa. A maceração química também resulta na perda de algum material carboidrato, e uma parte dos carboidratos é modificada. A holocelulose, ou fração de carboidratos da madeira, pode ser separada, através de solução alcalina, em alfa-celulose e hemicelulose. Para simplificar, a fração alfa-celulose será chamada apenas de celulose.

A fração hemicelulose finalmente é composta por dois tipos de compostos químicos (xilose e manose), que diferem dependendo, se a origem é de conífera ou dicotiledônea. Substâncias pectitinas formam um grupo menor de carboidratos nos constituintes da parede do elemento anatômico. Porque as pectitinas estão presentes em minoria e raramente são removidas por tratamentos químicos corriqueiros, elas muitas vezes são incluídas nos extratos. As dicotiledôneas, geralmente mais densas, contêm mais celulose do que as coníferas, geralmente menos densas (45% e 41%) e menos lignina (22% e 28%). Seu conteúdo de hemicelulose é aproximadamente igual a 30%. As dicotiledôneas são relativamente ricas em xilose, enquanto que as coníferas contêm mais manose. Dicotiledôneas e coníferas são relativamente uniformes dentro de suas respectivas classes, mas algumas poucas exceções ocorrem. O álamo, por exemplo, contém mais de 51% de celulose. Também a minoria das dicotiledôneas do clima tropical contêm 10% de lignina a mais do que as do clima temperado, aumentando a dureza .

2.4.6. DEFEITOS ANATÔMICOS

São considerados defeitos as anomalias e também as estruturas normais que possam desvalorizar, prejudicar, limitar ou impedir o processamento da madeira. Os defeitos segundo BURGER (1991) podem ser assim classificados:

- Defeitos na forma do tronco (tortuosidades; bifurcação ou aforquilhamento; conicidade acentuada; Sapopemas, contrafortes ou raízes tabulares; e, sulcos);
- Defeitos na estrutura anatômica da madeira (Grãos irregulares; largura irregular dos anéis de crescimento; crescimento excêntrico; lenho de reação; lenho de compressão; lenho de tração; tecido de cicatrização; e, nós);

- Defeitos causados por esforços mecânicos (rachaduras e falhas de compressão (brittle heart));
- Defeitos causados por agentes bióticos e climáticos (Alteração da cor; apodrecimento e perfurações; e, tecido de cicatrização); e,
- Prejuízos causados pela presença de substâncias especiais, que podem constituir defeitos, caso apresentem efeitos tóxicos ao homem, ou danifiquem as máquinas-ferramentas ao serem processadas como, por exemplo, serras e fresas, pela ação de substâncias inorgânicas duríssimas como, por exemplo, carbonatos de cálcio, ou ainda elevado teor de sílica.

O principal defeito sob a ótica da ferramenta é a presença de nós, que provoca o desgaste excessivo ou a quebra da ferramenta.

É a base de um ramo inserida no tronco, que desvia o crescimento dos tecidos, este pode ser vivo, morto ou solto. Estes quando mortos sofrem transformações que lhe proporcionara uma certa dureza, prejudicando assim o futuro desdobro da tora, além desses tipos de nós, existem nó inclusos que se encontra no interior do lenho. O crescimento irregular dos tecidos em volta do nó e até mesmo o nó desvalorizam a madeira, além de prejudicar o desempenho das ferramentas, mas em alguns casos estas deformações podem valorizá-la, quando um novo designer é exigido. É o principal fator na classificação da madeira em graus de qualidade.

2.4.7. PREPARAÇÃO DA MADEIRA PARA USO INDUSTRIAL E INVESTIGAÇÕES TECNOLÓGICAS

A natureza biológica da madeira torna-a susceptível ao ataque de fungos e insetos, devendo ser preservada a fim de se evitar essas agressões. Atualmente, medidas preventivas, que respeitam as regras de proteção ambiental, tornam as estruturas de madeira tão duráveis quanto as de aço.

DATE [1991] define que os tratamentos de preservação de madeira podem ser entendidos como a adoção de técnicas que têm como objetivo a proteção da madeira contra a ação dos agentes físicos, químicos e, especialmente, os biológicos, tanto no seu processo produtivo como na sua utilização. Dentre as técnicas existentes para preservar a madeira tem-se a preservação natural, indireta, biológica e química. No entanto, este tema foge do escopo deste trabalho e pela importância necessitaria de uma abordagem ampla e específica.

Outra importante etapa nos processos de industrialização de produtos florestais para todos os segmentos e para a investigação tecnológica da usinagem de madeiras, é o processo de secagem. Antes de ser utilizada, a madeira deve ser seca para evitar as contrações volumétricas. Uma secagem bem realizada é essencial para minimizar defeitos na madeira (empenamentos, trincas – rachaduras) e para obter um baixo teor uniforme de umidade que permita a usinagem, a colagem e o acabamento.

A água na madeira encontra-se em três formas bastante distintas: água de constituição, água de impregnação e água livre.

A água de constituição faz parte da constituição química da madeira, só sendo eliminada pela destruição da mesma.

A água de impregnação, também chamada de água higroscópia (celulose higroscópia), localiza-se no interior das paredes das células, entre as microfibrilas que formam a celulose. Essas microfibrilas têm avidez por água, a qual pode ser notada no algodão, que é celulose quase pura.

A água livre é aquela contida nos espaços vazios entre as células, nos vasos e poros, circulando livremente, facilmente removível e que não modificam as dimensões da madeira ao ser retirada.

Assim, ao secar-se uma madeira de árvore recém-abatida (completamente saturada de seiva, ou seja, água) a primeira água a sair é a água livre. Ao acabar-se a água livre começaria a sair a água de impregnação. Este é o chamado Ponto de Saturação das Fibras (PSF).

O teor de umidade no PSF pode variar bastante, de acordo com a espécie considerada, oscilando, em geral, entre 25% e 35%. Na prática, usa-se o valor médio aproximado de 30%, comum a muitas espécies de árvores [LANCHAS, 1998].

O Conceito de PSF é muito importante, pois explica a maior parte dos defeitos da secagem da madeira e conseqüentes problemas na usinagem. É fácil compreender, portanto, que abaixo do PSF toda a água é higroscópia, estando alojada entre as microfibrilas de celulose, separando-as ao secar, cada molécula de água que sai permite a aproximação das fibras, ocorrendo a contração da madeira afetando suas propriedades mecânicas.

Há uma tendência de que a madeira é tanto mais estável e melhor, quanto mais baixos e próximos forem os valores de contração nos sentidos tangencial e radial. A **tabela 1** apresenta os

valores médios comparativos para o mogno e as madeiras utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 1 : Valores de retração e inchamento para diferentes espécies (CALORI, 1997; NIEMZ 1993)

Espécie	Contração (%)		Índice de Retração
	Tangencial	Radial	
Mogno	4,50	3,20	1,4
E. dunnii	10,21	6,24	1,6
E. grandis (19 anos)	9,77	5,60	1,9
E. grandis (23 anos)	8,25	5,71	1,4
Buche (faia)	13,4	6,2	2,2

A comparação com a madeira de mogno é a mais tradicional por tratar-se da madeira com as melhores características a nível mundial.

Depois de uma amostra de madeira ficar exposta por algum tempo às condições naturais da atmosfera, o teor de umidade da superfície atinge o equilíbrio com a temperatura ambiente e a umidade do ar. Ligeiras flutuações em torno desse equilíbrio ocorrem em função de mudanças nestes fatores naturais. As porcentagens de umidade de equilíbrio variam de (5-8) % em climas secos e frios a (18 – 20) % em climas úmidos e quentes. O interior da madeira continua secando através da transferência da umidade para a superfície (onde se dá a evaporação) até o centro atingir a umidade onde cessa a secagem natural. A porcentagem de umidade de equilíbrio pode ser baixada através da secagem artificial em estufa.

O teor de umidade é o resultado da relação entre o peso da água contida e o peso desta madeira completamente seca, ou seja, no estado anidro. O resultado do teor de umidade é expresso, geralmente, em porcentagem.

O método de determinação do teor de umidade pode ser realizado através da secagem em estufa ou pelo método do uso de medidores elétricos.

O método da secagem em estufa consiste na determinação do peso da amostra da madeira na umidade em que ela se encontra. A amostra é colocada em uma estufa com temperatura de 103 ± 2 °C até que o seu peso (Ps) se torne constante, isto é, a diferença de peso entre duas

pesagens consecutivas seja menor que 10%. Calcula-se, então, a umidade, empregando a fórmula abaixo:

$$U (\%) = [(P_u - P_s)/P_s]*100$$

Onde:

U = Teor de umidade, em porcentagem

P_u = Peso úmido da amostra

P_s = Peso seco da amostra completamente seca

O método mais empregado na indústria e nas investigações científicas é o uso de medidores elétricos. O instrumento possui um eletrodo com, usualmente, duas ou quatro pontas, medindo a resistência elétrica entre estas pontas quando cravadas na madeira, fornecendo diretamente como leitura o teor de umidade.

O Departamento de Apoio e Desenvolvimento Técnico (DATE) relaciona ainda alguns aspectos sobre a secagem da madeira, que apresenta uma série de importantes vantagens:

- substancial redução do peso, com a conseqüente diminuição dos custos dos transportes;
- aumento da resistência biológica após a secagem contra o ataque de fungos manchadores e apodrecedores, bolores e a maioria dos insetos que a atacam;
- as contrações, isto é, os encolhimentos que acompanham a secagem ocorrem antes da madeira ser transformada no produto final;
- a secagem melhora a maioria das propriedades mecânicas da madeira, tais como a resistência à compressão, resistência à flexão, dureza, etc.;
- as resistências das uniões ou juntas feitas com pregos e parafusos são maiores em madeira seca do que em madeira verde;
- a madeira úmida não é adequada para os processos de remoção de cavaco, para a colagem ou determinados processos de tratamento preservativo;
- a maioria das deformações, empenamentos e rachaduras da madeira ocorrem durante a secagem mal conduzida. Produtos de madeira fabricados com madeira seca estão livres da ocorrência desses defeitos;
- a madeira só pode receber pintura, verniz, laca, e outros acabamentos se, pelo menos, for seca ao ar; e,

- a secagem aumenta a resistência elétrica da madeira tornando-a isolante e melhorando suas propriedades de isolamento térmico.

É importante destacar que o tema relativo a madeira mais pesquisado no mundo é a secagem, seja a secagem natural ao ar livre e/ou a secagem artificial, por ser uma fase importante e complexa no ciclo de processamento da madeira.

A escolha e a utilização de uma determinada espécie para a indústria só poderá ser realizada com o conhecimento de suas características físicas, químicas e anatômicas por serem responsáveis pelas propriedades mecânicas da madeira, objeto de interesse na fase de processamento da madeira.

2.4.8. PROCEDÊNCIAS DAS ESPÉCIES FLORESTAIS ESTUDADAS

A espécie *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ocorre originalmente nas regiões costeiras da Austrália em Newcastle, ao norte de Nova Gales do Sul, no sudoeste de Queensland em pequenas áreas próximas a Mackay e no planalto de Atherton. A ocorrência principal está situada entre 26° e 32° de latitude Sul. Na região central de Queensland a 17° S (FAO, 1992). Ocorre entre 0 (zero) e 500 m de altitude em Nova Gales do Sul, e entre 800 e 1.000 m no planalto de Atherton. O clima é predominantemente subtropical na região norte, e temperado no limite sul da ocorrência natural. Nas regiões costeiras não ocorrem geadas, algumas geadas ocasionais ocorrem longe da costa em altitudes mais elevadas. O regime de chuvas é estacionário de verão, com precipitação anual total de 1.000 a 1700 mm, sendo a precipitação do mês mais seco superior a 25 mm [CARRERE, 1996].

A madeira testada de *Eucalyptus grandis* foi produzida pela empresa florestal KLABIN no município de Telêmaco Borba - PR, originada de florestas implantadas com sementes de procedência da Austrália. São amostras de madeira comercial.

A espécie *Eucalyptus dunnii* ocorre originalmente em áreas restritas do leste de Warwick, Qld, até o oeste Coffs Harbour, N.S.W. Cresce em terra basáltica em mais baixas rampas, vales e cumes, em floresta aberta alta perto de floresta tropical. Região: MCPH.

A madeira testada de *Eucalyptus dunnii* foi produzida pela Empresa Brasileira de Pesquisa em Agropecuária – EMBRAPA, originada de florestas implantadas pelo centro de pesquisas florestais em Colombo – PR com sementes de procedência da Austrália. São amostras de madeira acompanhadas para investigações científicas e para posterior distribuição de mudas para os agricultores no Sul do Brasil.

A espécie *Fagus Sylvática* (Rotbuche), angiosperma dicotiledônea de zona temperada, foi adquirida comercialmente em distribuidores de madeiras do norte da Alemanha.

2.4.9. INFLUÊNCIA DA ESPÉCIE DE MADEIRA SOBRE OS CRITÉRIOS DE USINABILIDADE

A Usinabilidade é a propriedade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte. Na usinagem com remoção de cavacos (transformação de uma tábua ou um caibro em um produto, pode ser um componente de um móvel) verifica-se que as diversas espécies de madeiras se comportam de modo distinto, sendo que algumas podem ser processadas com grande facilidade, enquanto que outras oferecem uma série de problemas ao operador da máquina-ferramenta".

A grã da madeira e a presença ou não de nós fornecem uma idéia da facilidade ou não de se conseguir um bom acabamento superficial das peças. Madeiras com grã irregular apresentam superfície áspera nas regiões nas quais a ferramenta corta em sentido contrário à direção normal dos tecidos.

Madeiras excessivamente moles (baixa densidade) apresentam também dificuldades quanto à obtenção de superfícies acabadas com baixos valores de rugosidade, pela ocorrência de um arrancamento das células destes tecidos frágeis, resultando numa superfície aveludada. Por outro lado, espécies com densidade muito alta são difíceis de serem trabalhadas, por provocarem grande desgaste nas ferramentas em vista de sua acentuada dureza.

Substâncias especiais presentes em certas espécies (canais celulares e intercelulares, células oleíferas, etc.) causam dificuldades nas operações de desdobro e de processamento quando agressivas à saúde ou por se aderirem às ferramentas. Um caso especial sob este aspecto é a presença de sílica nas células.

O teor de umidade presente na madeira tem importância na análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas, sobre as forças de usinagem e a qualidade superficial.

Na usinagem de madeira verde, que implica em elevados teores de umidade, o mecanismo de desgaste das ferramentas é o abrasivo e corrosivo, enquanto que na madeira sazoadada, o mecanismo de desgaste é basicamente abrasivo. Na usinagem de compostos de madeira, o mecanismo de desgaste é o abrasivo. Existem poucos trabalhos científicos sobre a relação da vida da ferramenta com os mecanismos de desgastes envolvidos, sobretudo para as várias combinações ferramenta- peça- máquina-ferramenta [GOTTLOB, 1991].

KIVIMAA [1952] concluiu que o desgaste das ferramentas não era apenas um fenômeno de abrasão mecânica, mas envolvia também fenômenos químicos, pela presença de ácidos orgânicos, e eletroquímicos, provocados pelos extratos da madeira.

CHARDIN [1971] apresentou os principais fatores, que eram conhecidos, sobre o desgaste dos dentes da serra na usinagem de madeira, que influenciam o desempenho das ferramentas.

Sobre a influência da espécie de madeira, Chardin relatou que se o desgaste do dente for expresso em termos de perda unitária de massa de metal por unidade de comprimento de corte, dependendo da espécie esta razão pode atingir o valor de 1:120.000. Se for considerado diferentes árvores da mesma espécie, a variação da razão mencionada é comumente 5, mas se a espécie contém sílica, pode chegar 10 ou 20.

Sobre a influência do teor de umidade Chardin concluiu, que nas madeiras que contém sílica, a influência da umidade somente se faz sentir nas madeiras de baixa e média densidade. Para estas espécies a abrasividade da madeira seca é comumente de 4 a 10, ainda maior, em comparação com a abrasividade das madeiras verdes, devido a resistência ou a dureza da madeira que contém cristais de sílica. Para as madeiras que não contém sílica, o desgaste pode ser 4 ou 5 vezes maior nas madeiras verdes, em comparação com a madeira seca. Este fenômeno é observado com maior facilidade nas madeiras de baixa densidade do que nas madeiras de alta densidade e pode ser relacionado ao efeito eletroquímico.

Sobre a influência de diferentes materiais da ferramenta na usinagem de madeiras que contém sílica, considerou que a resistência ao desgaste do aço carbono para ferramentas AISI – tipo 140 é de uma unidade. Então a resistência do aço é aproximadamente 5. A resistência das cunhas de corte do stellite varia de 10 a 20, dependendo do stellite. O metal duro possui resistência superior a 50. Dentes de serras revestidos com cromo duro desgastam-se mais rapidamente do que os dentes de stellite.

Investigações sobre a influência do tipo de madeira e o seu respectivo teor de umidade sobre as forças de usinagem foram realizados por Kivimaa [1952] e Pahlitzsch [1957]. A influência da umidade para madeiras secas ao ar ou em estufa é comparativamente pequena. Pahlitzsch [1957] determinou que para amostras de *Fichte* com até 14% de teor de umidade nenhuma influência sobre a força de corte. Kivimaa [1952] constatou que para *Birke* nos três diferentes sentidos de corte havia uma suave distinção máxima para o teor de 10%. Kivimaa

observou também, que as forças de corte diminuía suavemente com a elevação da temperatura da madeira.

Enquanto Kivimaa determinou uma perfeita relação entre a densidade dos 21 diferentes tipos de madeiras analisados e a força de corte, esses resultados não foram confirmados por Pahlitzsch e Schulz [1957]. Porém, em um trabalho posterior foi constatado por Pahlitzsch [1966], que a densidade apresenta um valor de referência para a força de corte esperada.

Finalmente, Kivimaa determinou uma considerável influência do sentido de corte sobre as forças de usinagem.

Inicialmente, definiu o corte ortogonal como sendo a situação onde o gume da ferramenta é perpendicular à direção do movimento relativo da ferramenta e da peça de madeira e quando a superfície da madeira obtida é paralela às anteriores. Máquinas tais como a serra fita, a serra circular e as plainas de corte plano podem ser estudadas utilizando os princípios de corte ortogonal. Kivimaa [1952] e Mackenzie [1960] propuseram então uma notação com dois números para descrever situações diferentes de corte que podem ocorrer durante o corte ortogonal da madeira. O primeiro número representa o ângulo entre o gume da ferramenta e a fibra da madeira; o segundo indica o ângulo entre a direção de corte e a fibra da madeira. Esta notação define as três principais direções de corte que são mostradas na **Figura 7**, chamados de 90-0, 90-90 e 0-90. A situação 90-0 é encontrada em ações de corte como no processo de fresamento, em aplainamento ou desengrosso e trabalhos de corte de molduras na direção paralela às fibras. O trabalho da serra fita é um típico caso de corte 90-90.

Segundo Kivimaa, as maiores forças de usinagem apareceram no sentido radial (sentido A; **Figura 7**), as menores no sentido transversal (sentido C; **Figura 7**). As forças de usinagem no sentido tangencial (sentido B (90° - 0°), **Figura 7**) foram levemente mais elevadas do que para o sentido transversal, embora apresentou-se um valor mínimo para as fibras. Também Jostmeier [1966] determinou para diferentes tipos de madeira em torno do dobro da força de corte para a mudança de sentido tangencial para o transversal.

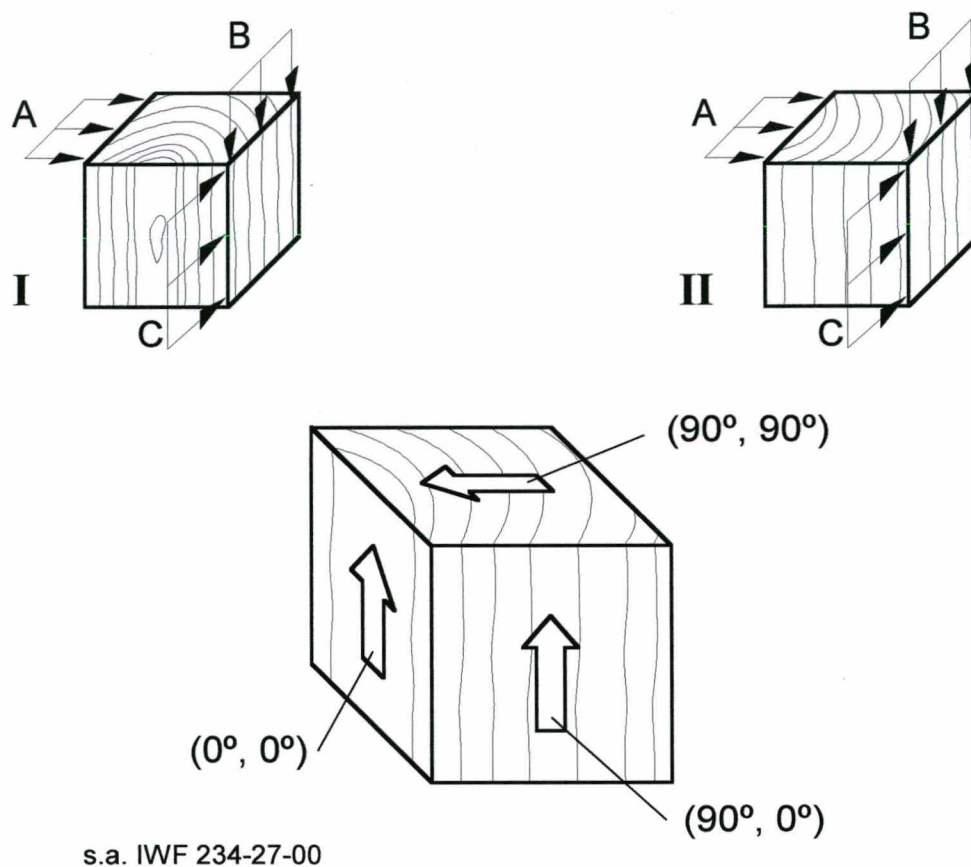


Figura 7 – Sentidos relativos de corte para madeira maciça, segundo Kivimaa.

A influência de diferentes tipos de madeira sobre a vida da ferramenta foi discutida por Barz e Breier [1971]. A relação de desgaste de alguns tipos de madeira tropical como, por exemplo *Basralocus*, foi um fator em torno de 500 vezes maior do que, por exemplo, do tipo Meranti. Porém foram empregadas na pesquisa somente ferramentas de aço-ferramenta. Uma importante observação de ambos os pesquisadores foi o efeito do desgaste do gume sobre a textura superficial da peça de madeira, que para algumas madeiras transcorreu de forma muito diferente. Ettel [1987] destaca neste contexto sobre as variações marcantes em função das condições de crescimento e do local analisado para diferentes árvores até mesmo dentro da mesma árvore.

Alguns trabalhos científicos importantes na área de usinagem de madeiras abordam o efeito da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta.

Kivimaa [1952] pela primeira vez analisou a influência da velocidade de corte em relação a vida da ferramenta na usinagem de *Betula Filandesa* na direção perpendicular as fibras e pinho

seco. Empregou ferramentas de aço carbono com dureza de 59 Rc, ângulo de saída $\gamma=35^\circ$ e ângulo de incidência $\alpha=10^\circ$. Para velocidades de corte mais baixas, a velocidade de desgaste era mais alta. O desgaste ocorreu em duas etapas: na primeira, quando o percurso de usinagem atingiu 300 m, o fio de corte ótimo desapareceu. A partir daí, inicia-se um desgaste lento e progressivo.

Stefaniak [1971] realizou ensaios com serras circulares de metal duro na usinagem de chapas de aglomerado. Verificou que a influência da velocidade de corte no desgaste em baixas velocidades é mais significativo do que em velocidades mais altas, atentando-se para o fato que a relação entre a velocidade de corte e o desgaste não é linear. Observou-se também que existe uma correlação entre a velocidade de corte e a amplitude de oscilação lateral da serra, interferindo no acabamento superficial. Na faixa de velocidades de 33 a 79 m/s, o aumento dessa amplitude é diretamente proporcional a velocidade de corte. A partir de 79 m/s ocorre um grande incremento dessa amplitude até a velocidade de 100 m/s; de 100 a 124 m/s, o incremento da amplitude de oscilação diminui. Observou ainda, que na serra desgastada, existe um amortecimento maior da amplitude de oscilação, pois o canal de corte devido ao desgaste dos dentes da serra é mais estreito.

Hayashi e Suzuki [1983] investigaram a relação entre a velocidade de corte e o desgaste da cunha de corte durante o fresamento periférico de madeira seca com e sem a presença de sílica. O desgaste do gume foi comparado a comprimentos iguais de percurso de corte, sendo que a velocidade de corte variou de 3,8 a 45,2 m/s. Na usinagem com ferramentas de metal duro, o desgaste da cunha permaneceu constante para ambas as espécies em toda a faixa de velocidade. Com ferramentas de aço rápido e aço liga no fresamento de madeiras sem sílica, o desgaste decresceu com o aumento da velocidade de corte até 22,6 m/s; a partir daí, tornou-se constante. Por outro lado, quando foram fresadas madeiras com a presença de sílica com ferramentas de aço, o desgaste da cunha de corte aumentou com a velocidade de corte.

Saljé, Drückhammer e Stülmeier [1985] investigaram diferentes velocidades de corte e foram medidos pela primeira vez simultaneamente durante o processo de fresamento periférico da borda de chapas de aglomerado, com ferramentas de metal duro, a qualidade da aresta usinada da peça, o desgaste da cunha de corte, a potência absorvida pela fresa e o ruído gerado. Comparativamente, em relação ao avanço por dente f_z , a velocidade de corte e a profundidade de corte são pequenas. Com a $v_c = 70$ m/s, o desgaste da ferramenta, a imperfeição da aresta usinada e a potência consumida foram menores em comparação com os resultados obtidos com a $v_c = 60$ m/s.

Gottlob [1996] determinou as curvas de vida no fresamento de madeiras de *Eucalyptus grandis*, tanto no estado saturado de água como no estado seco ao ar, com ferramentas de aço AISI tipo D6 e o Stellite-1 usinando o mesmo corpo de prova. Os resultados experimentais mostraram tendências diferentes para as curvas representativas de vida das ferramentas. Neste caso, a velocidade de corte influencia na velocidade de desgaste das ferramentas. Para a madeira seca ao ar, para velocidades mais baixas, a vida mantém-se alta. A partir de ____ m/s, a vida das ferramentas cai, enquanto que para a madeira saturada de água, aumentando-se ligeiramente o valor da velocidade de corte, a vida das ferramentas diminui e, a partir de ____ m/s, a vida da ferramenta estabiliza-se. Na usinagem de madeira saturada de água, o desgaste das ferramentas de corte segue o modelo clássico da equação de Taylor $V^n.T = C$. A ferramenta de stellite-1 apresentou um desempenho melhor na usinagem, tanto no estado saturado de água como no estado seco, embora tenha dureza menor que o aço AISI tipo D-6. Isto ocorre devido a sua maior resistência a corrosão e pela manutenção da dureza a quente até temperaturas da ordem de 700°C. A madeira de eucalipto seca ao ar apresenta sempre ainda um pH da ordem de 3,8. A madeira Eucalipto saturada de água desgastou as ferramentas com uma velocidade maior, embora comparativamente mais mole que a madeira seca ao ar. Recomenda-se o emprego de elevadas velocidades de corte, naturalmente dentro dos limites permitidos pela dinâmica das máquinas-ferramentas.

2.5. GRANDEZAS DE ENTRADA

Os parâmetros de regulagem no fresamento possibilitam aos usuários influenciar sobre o tipo de interação entre ferramenta e peça. Ainda pode-se distinguir, se somente será variado o volume usinado específico Q ou a velocidade relativa entre a ferramenta e a peça. Por último, pode-se ainda alterar os mecanismos fundamentais do processo de usinagem.

As principais grandezas de regulagem, ataque e processo estão mostradas na **Figura 8**. Estas grandezas são importantes para a descrição, análise e interpretação dos resultados do processo. A largura de corte ou incremento lateral a_e e a profundidade de corte a_p influenciam em especial as forças de usinagem e o volume usinado específico.

O volume usinado específico Q , que é o volume de material usinado na unidade de tempo, é dado por:

$$Q = \frac{V_w}{t_c} = a_e \cdot a_p \cdot v_f \quad (3)$$

O ângulo de ataque na ferramenta φ , medido entre o sentido de corte e o sentido de avanço define se o fresamento será discordante ($\varphi < 90^\circ$) ou concordante ($\varphi > 90^\circ$). Em alguns casos pode ocorrer tanto o fresamento discordante como concordante no mesmo processo como, por exemplo, no fresamento conjugado de topo e periférico de uma ranhura.

A velocidade resultante do gume resulta da sobreposição dos movimentos de rotação da ferramenta (velocidade de corte v_c) e de translação (velocidade de avanço v_f), através da qual a peça é fresada. Em todos os casos práticos $v_c \gg v_f$ podendo ser equiparada a velocidade resultante $\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f$ com a velocidade de corte e o movimento relativo na forma de um ciclóide entre gume e peça pode ser aproximado através de um arco de círculo. A distância dos arcos de círculo de dois ataques consecutivos do dente corresponde o avanço por dente f_z .

$$v_c = d \cdot \pi \cdot n \quad (4)$$

$$f_z = \frac{v_f}{(z \cdot n)} = \frac{(v_f \cdot \pi \cdot d)}{(v_c \cdot z)} \quad (5)$$

$$v_f = n \cdot f_z \cdot z = \left(\frac{f_z \cdot z \cdot v_c}{\pi \cdot d} \right) \quad (6)$$

Onde z é o número de dentes do gume e d o diâmetro da ferramenta, n é a rotação da ferramenta.

No processo de fresamento, a grandeza de ataque a_e implica no resultado de trabalho relativo ao acabamento superficial. Juntamente com o diâmetro da ferramenta d , a_e determina o ângulo de ataque φ_e e o percurso de corte l_c . l_c é o percurso, que cada gume por ataque ou penetração no sentido de corte percorre na peça.

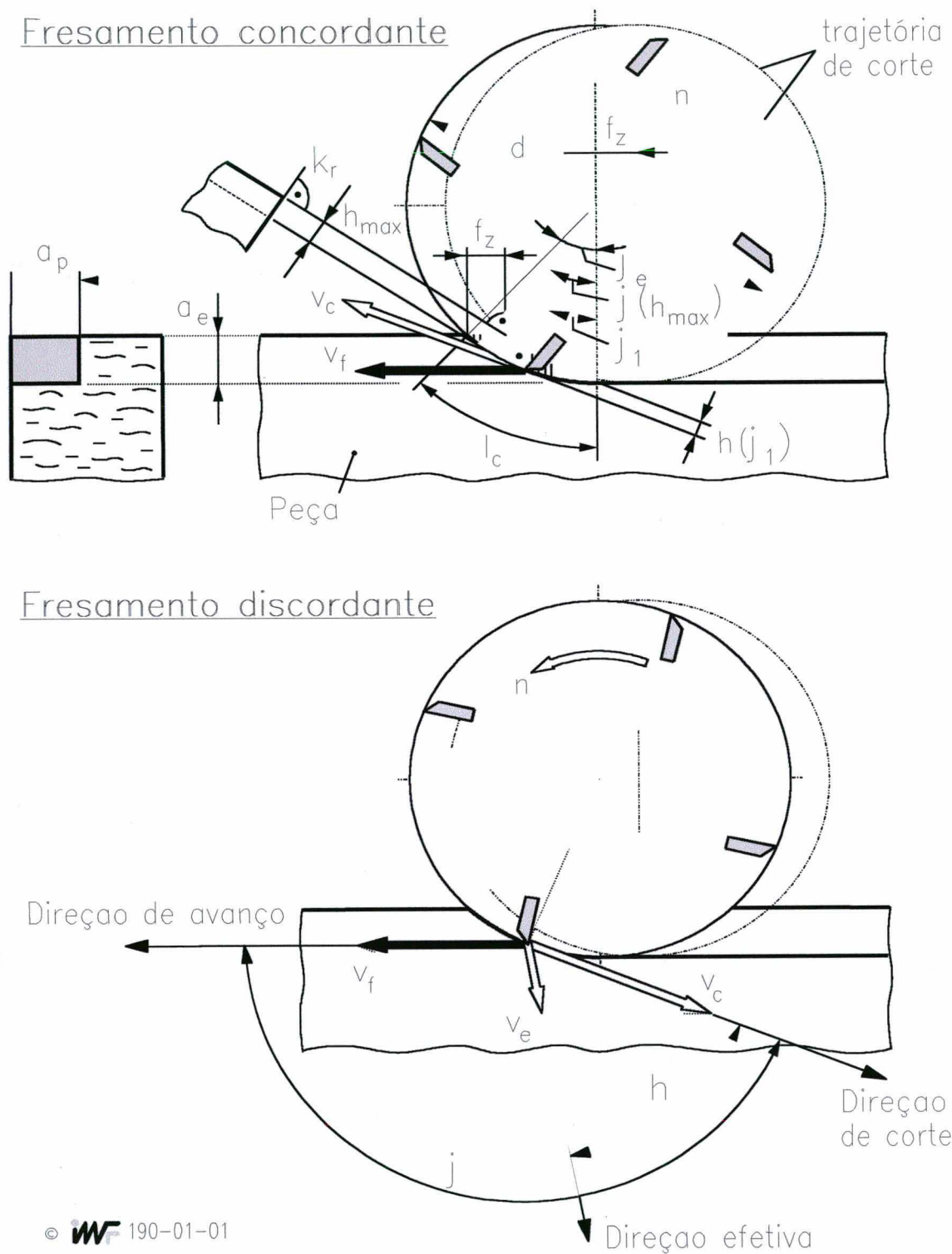


Figura 8 – Principais grandezas no processo de fresamento.

$$\varphi_e = \arccos\left(1 - \frac{2ae}{d}\right) \quad (7)$$

$$l_c = \frac{(\varphi_e \cdot \pi \cdot d)}{360^\circ} = \frac{[\arccos(1 - 2 \cdot a_e / d)] \cdot (\pi \cdot d)}{360^\circ} \quad (8)$$

Para a análise do critério do desgaste da ferramenta, o percurso de corte total é fundamental. O percurso total de corte l_{ctot} é o percurso, que todos os gumes de uma ferramenta percorrem dentro do percurso de avanço na usinagem da peça.

$$l_{ctot} = l_c \cdot n \cdot t_c = l_c \cdot \frac{l_f}{f_z} \quad (9)$$

As grandezas velocidade de avanço v_f , velocidade de corte v_c e o avanço por dente f_z estão intrinsecamente correlacionados:

Finalmente, na literatura também é freqüentemente empregado para caracterizar o processo de fresamento a espessura de usinagem média h_m , que é a relação entre o avanço por dente e a largura de corte a_e :

$$h_m = \frac{(f_z \cdot a_e)}{l_c} \cdot \sin \chi_r \quad (10)$$

ou ainda

$$h_m = f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{d}} \quad (11)$$

As equações acima estão correlacionadas ao plano ortogonal, segundo a norma /DIN 6580/. Se o gume da ferramenta possui um ângulo de inclinação λ , diferenças tão insignificantes podem emergir de acordo com o local do corte observado.

Com o elevado desenvolvimento tecnológico das técnicas de controle e em especial dos sistemas de trocas de ferramentas e peças, os tempos secundários para o processo de fresamento puderam ser reduzidos consideravelmente. Com isso, apresentou-se a redução dos tempos principais para algumas aplicações como grande potencial para a diminuição dos custos de produção, o que conduziu para o desenvolvimento de máquinas-ferramentas e conseqüente otimização do processo.

O tempo principal é inversamente proporcional ao volume usinado específico Q . Em regra geral são otimizados, em função do resultado de trabalho desejado, tanto a área de usinagem A ($A = a_p \cdot f$) como também o avanço por dente f_z . Também o número de gumes não pode ser elevado livremente sem critérios. Na usinagem de madeiras no sentido longitudinal tangencial das fibras com o objetivo de elevar o rendimento do processo e, em alguns casos, a melhoria do acabamento superficial e da vida da ferramenta recomenda-se elevar a rotação da ferramenta e consequentemente a velocidade de corte, dentro dos limites permitidos pela dinâmica das máquinas-ferramentas [Fuß, 1995].

Hayashi e Suzuki [1983] empregando ferramentas de metal duro no fresamento de diversas espécies de madeira concluíram que o desgaste da cunha de corte foi constante para todas as madeiras testadas em toda a faixa de velocidade experimentada, permitindo o aumento do rendimento do processo com a manutenção do acabamento superficial.

Klamecki [1981] recomenda usar o maior avanço possível dentro das faixas aceitáveis de acabamento fino em detrimento de um pequeno aumento do desgaste dos dentes da serra.

Para a verificação da influência do avanço sobre as forças de usinagem e o acabamento superficial de peças geradas através da usinagem com ferramentas de metal duro, é usual a realização de ensaios sistemáticos para diferentes valores de avanço, mantendo-se as demais grandezas de trabalho constante, medindo-se simultaneamente as forças de usinagem e posteriormente a rugosidade e analisando-se os danos superficiais porventura existentes.

Sobre influência do avanço sobre o processo de fresamento existe uma literatura uniforme. Os principais trabalhos são [PROKES, 1961; WEBER, 1962; JOSTMEIER, 1966; SANDVOß, 1971; DRÜCKHAMMER, 1988; STÜHMEIR, 1989; LICHER, 1993; FUß1995]. A maioria das investigações discute o fresamento de compostos de madeira.

Os avanços por dente f_z , nas operações de fresamento conjugado com rotações máximas de até 18.000 rpm para madeira maciça com acabamento superficial extra fino e fino, situam-se na faixa de 0,5 a 1,7 mm, segundo a Fa. Leitz – fabricante de ferramentas para usinagem de madeiras.

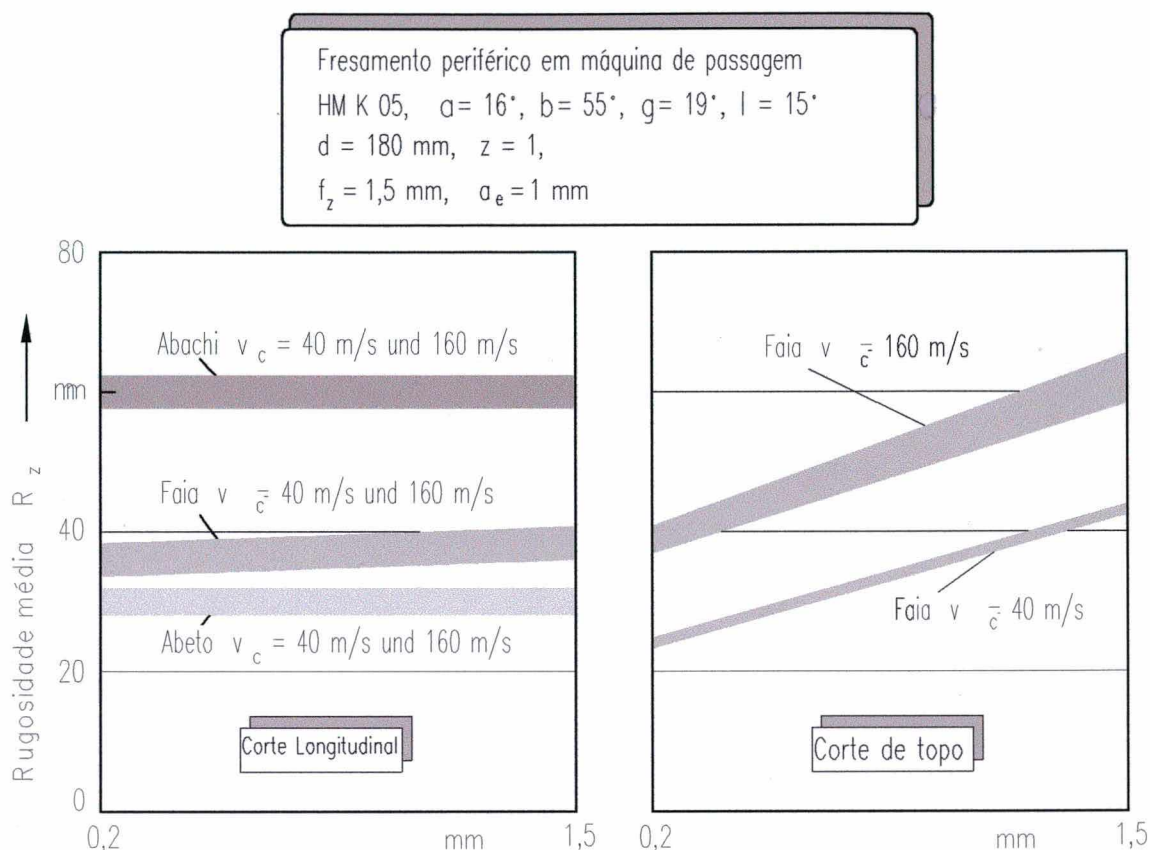


Figura 9 – Influência do avanço no fresamento de madeiras maciças [Fuß, 1995].

Com o uso de baixos avanços ocorre um desgaste excessivo da ferramenta, porém o acabamento é melhor. Já com o uso de altos consegue-se um aumento na vida da ferramenta, entretanto podem ocorrer marcas na superfície da peça e um acabamento ondulado.

LICHER [1993] determinou para o processo de fresamento a dependência entre o avanço e a qualidade, o desgaste da ferramenta e as forças de usinagem para chapas de MDF revestidas e para chapas de aglomerado. A qualidade piora, o percurso de usinagem torna-se menor, e as forças de usinagem aumentam tanto no sentido de avanço quanto no radial com o aumento do avanço.

Fuß [1995] analisou a influência do avanço sobre a textura superficial no processo de fresamento periférico de madeiras no sentido longitudinal tangencial. Concluiu que o resultado de trabalho era quase que independente do avanço (**Figura 9**). Justificativa foi a estrutura da madeira. A ligação entre as fibras são relativamente fracas e deixam-se se separar com ferramentas de gume afiado.

2.6. GRANDEZAS DO PROCESSO

As grandezas do processo caracterizam o momento atual do processo. Elas são para o usuário especialmente interessante, se pretender interpretar, compreender ou otimizar o processo em andamento.

2.6.1. FORÇAS E POTÊNCIA DE USINAGEM

Apesar dos grandes progressos feitos nos últimos anos na tecnologia de usinagem de madeiras maciças e de seus compostos, ainda faltam conhecimentos sobre o mecanismo de corte e sobre as condições de corte ótimas durante a usinagem de madeiras de floresta plantada em diferentes condições de avanço, como as que normalmente ocorrem com madeiras de floresta temperada e nativas de florestas tropical e subtropical. Muitos dos parâmetros de entrada, como as propriedades do material da peça, sua orientação das fibras e estrutura anatômica, a geometria e propriedades do material da ferramenta e o comportamento estático, dinâmico e térmico da máquina-ferramenta têm importante papel neste processo. Estes parâmetros interagem com as tensões, forças e temperaturas, de forma que grande parte destes têm, direta ou indiretamente, influência sobre a qualidade final da peça. Uma ferramenta útil e essencial sobre a compreensão dos fenômenos que ocorrem na usinagem é entre outras, portanto, a medição e análise das componentes de força que ocorrem durante o processo de fabricação.

Para deformar um material durante a usinagem e obter-se a remoção de cavacos, a ferramenta empregada deve atuar com uma determinada força sobre a peça usinada. O conhecimento da grandeza e direção da força de usinagem, respectivamente suas componentes F_c , F_f e F_p , são importantes no projeto de elementos de máquinas-ferramentas, como acionamentos, guias, mancais, sistemas de fixação das ferramentas e dispositivos de fixação das peças, na determinação dos parâmetros de corte para o planejamento dos trabalhos de usinagem, no conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo de corte, no esclarecimento dos mecanismos de desgaste e na estimativa da precisão atingível durante a usinagem sob determinadas condições de corte.

As forças de usinagem oferecem indicação do carregamento sobre o gume, a peça e a máquina-ferramenta. Através delas podem ser determinadas a potência de acionamento necessária da árvore da máquina e dos avanços. Também pode ser estimada o estado de desgaste do gume da ferramenta e com isso a textura superficial esperada da peça, bem como a sua

integridade superficial (deformação das primeiras camadas da estrutura em contato com a superfície).

A capacidade de medir as forças tem importantes conseqüências na automatização do processo de fabricação, onde a verificação do desgaste da ferramenta em tempo real é necessária para o controle do desgaste da ferramenta e dos problemas de qualidade nas peças fabricadas na produção em grande escala.

A medição das forças de usinagem é prejudicada pelas muitas grandezas perturbadoras do processo. A montagem da cadeia de medição é, portanto, decisiva para a eficácia da medição das forças.

O emprego de sistemas de medição de forças baseados no princípio piezelétrico tem-se revelado, até o momento, como o mais adequado também para o processo de fresamento em altas velocidades. Esta escolha baseia-se principalmente nas características que estes sistemas apresentam, como a elevada sensibilidade, alta freqüência própria, possibilidade de medição de dinâmicas elevadas, histerese baixa, linearidade e facilidade de amplificação, tratamento e análise do sinal gerado.

Basicamente, as forças podem ser medidas em dois sistemas de referência. Pelo lado da ferramenta ou pelo lado da peça. Na medição de forças em ferramentas rotativas, normalmente sobre o rendimento do motor, existe o problema, que as forças de corte são sobrepostas pelas forças de aceleração dos cavacos produzidas pela velocidade periférica da ferramenta. Na medição das forças de avanço junto a peça existe o problema com o transdutor de força, que o sistema de medição com elevada rotação da ferramenta é excitada por vibrações, que influenciam o resultado de medição. A filtragem do sinal geralmente não é possível, se a freqüência de ataque da ferramenta coincide com a freqüência natural. Impede-se a análise da influência das forças perturbadoras provocadas pela vibração natural das massas do respectivo sistema de medição, que com a elevação da freqüência da ferramenta, se sobrepõem fortemente as forças de usinagem.

A determinação das componentes da forças foi sempre uma parte importante na pesquisa de operações de usinagem. Os fundamentos básicos da usinagem de madeiras foram estudados, inicialmente, por Kivimaa [1952], Jostmeier [1966], Sandvoß [1971] e Fischer [1979].

A divisão da força de usinagem em componentes está mostrada na **Figura 10**.

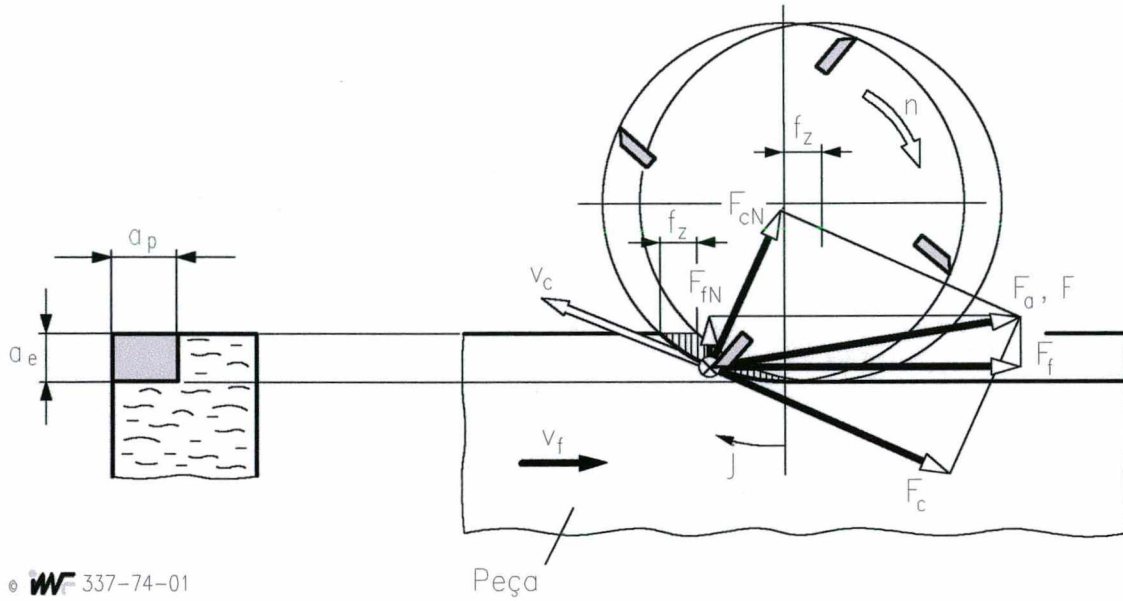


Figura 10 – A força de usinagem e suas componentes.

A componente no plano de trabalho corrente é mostrado com a força ativa F_a . Ela pode ser subdividida em duas outras componentes, nominalmente no sentido de avanço e perpendicular a ele, ou em um sistema de coordenadas em torno do eixo da ferramenta. Isto vale então:

$$F_a = \sqrt{F_c^2 + F_{cN}^2} = \sqrt{F_f^2 + F_{fN}^2} \quad (12)$$

Uma outra apresentação das componentes de força é possível através do conhecimento do ângulo de ataque φ :

$$F_c(\varphi) = F_f(\varphi) \cdot \cos(\varphi) - F_{fN}(\varphi) \cdot \sin \varphi \quad (13)$$

$$F_{cN}(\varphi) = F_f(\varphi) \cdot \sin \varphi + F_{fN}(\varphi) \cdot \cos \varphi \quad (14)$$

onde

$$\varphi_e = \arccos\left(1 - \frac{2ae}{d}\right) \quad (15)$$

Na busca de uma sistemática para a descrição das forças que ocorrem na usinagem com ferramentas de geometria definida foram desenvolvidos diversos modelos, baseados em diferentes estratégias.

A partir de uma grande quantidade de ensaios de usinagem para o processo de torneamento, foi proposto por Kienzle (1951) o conhecido modelo que descreve o comportamento das forças na usinagem. O Modelo de Kienzle é o mais conhecido até o momento e pode ser empregado com boa precisão para os diversos processos de usinagem.

A força específica de corte é uma das mais importantes grandezas para caracterizar a usinagem de um material. O valor é dependente das condições de usinagem, da geometria da ferramenta e das características do material usinado. Atendo-se aos parâmetros de corte constante, possibilita-se então uma comparação da força específica de corte para os diferentes tipos de madeira e tem-se então valores informativos relativos sobre a usinabilidade.

Este modelo estabelece uma relação não linear entre a força específica de corte e a espessura de usinagem h , que pode ser representado como uma reta no intervalo de espessuras pesquisado ($0,2 \text{ mm} < h < 2 \text{ mm}$) em representação bilogarítmica.

As componentes da força de usinagem são diretamente proporcionais a largura de usinagem b . Para permitir reconhecimento das leis empíricas recomenda-se, geralmente, que o valor medido seja correlacionado diretamente com as grandezas lineares e, com isso, reduzir o número de variáveis que entram na lei que rege o processo de usinagem. Nesse caso forma-se o coeficiente da força de corte e a largura de usinagem F_c/b . Se os valores assim obtidos são plotados em uma folha bilogarítmica correlacionados com a espessura de usinagem, então tem-se os pontos de medição localizados sobre uma reta. A equação correspondente da reta obtida é [KÖNIG, 1990]:

$$\log\left(\frac{F_c}{b}\right) = \log(k_{c1,1}) + (1 - m_c) \cdot \log h \quad (16)$$

que pode ser transformada na equação de Kienzle:

$$F'_c = k_{c1,1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad \text{com } F'_c = \frac{F_c}{b} \quad (17)$$

A força específica de corte $k_{c1,1}$ indica a força de corte, que é necessária para usinar um cavaco com largura de usinagem $b=1\text{mm}$ e a espessura de usinagem $h=1\text{mm}$. O expoente $(1-m_c)$ indica a inclinação da reta $F_c/b = f(h)$, no sistema bilogarítmico (**figura 32**, capítulo 7).

Segundo Jostmeier [1966] distingue-se entre o valor principal da força específica de corte $k_{c1,1}$ e a própria força específica de corte k_c . A equação de Kienzle pode ser escrita então da seguinte forma:

$$F_c = k_c \cdot h \cdot b \quad \text{com } k_c = \frac{k_{c1,1}}{h^m} \quad (18)$$

Os valores assim determinados, no entanto, só valem para espessuras de usinagem acima de 0,1 mm ($h > 0,1$ mm).

2.6.2. DESGASTE DA FERRAMENTA

O desgaste do gume da ferramenta como consequência da interação entre ferramenta e peça tem por consequência um processo de usinagem não estacionário, então deve ser entendido como um processo alternando-se continuamente. O processo de desgaste deve ser compreendido e dominado de forma generalizada, pois os efeitos sobre o processo são essenciais para o aumento da produtividade, bem como da otimização do processo de usinagem, mas em especial também para o controle e regulagem do processo, que deve achar para um ponto ótimo do processo para cada estado da ferramenta.

Fundamentalmente, os mecanismos básicos de desgaste na ferramenta de corte com geometria definida conhecidos são as solicitações mecânicas e térmicas, a adesão, a difusão, a abrasão mecânica, bem como oxidação. Um grande número de pesquisadores como, por exemplo, [FISCHER, 1983; LICHER, 1993; STÜHMEIER, 1989] estão convencidos, que o desgaste no processo de fresamento de madeiras maciça com teor de umidade de até aproximadamente 15% e de seus compostos é causado quase que exclusivamente através da abrasão mecânica e da solicitação mecânica. Somente Porankiewicz [1993] relatou que tinha encontrado provas sobre uma significativa influência do desgaste químico no fresamento de chapas de aglomerado revestido com melanina.

Foi desde Kivimaa [KIVIMAA, 1952] e por muitos outros pesquisadores [JOSTMEIER 1966; PAHLITZSCH 1966; SANDVOß, 1971; FISCHER 1983; STÜHMEIER, 1989; PROKES, 1970; SALJÉ, 1988] que se determinou decisivamente quais as grandezas de influência do desgaste da ferramenta. Decisivos são a combinação entre o material da ferramenta e da peça com suas respectivas características específicas. Em especial se destacam a dureza do material da ferramenta de corte, bem como a densidade e o teor de inclusões minerais do material da peça. Ainda o desgaste da ferramenta aumenta com a elevação da velocidade de corte e de avanço, bem como da profundidade de corte.

O desgaste do gume para o processo de fresamento de madeiras e de seus compostos aparece normalmente através de um arredondamento do gume, que podem ser caracterizados

através das grandezas significativas como o deslocamento do gume SV. O arredondamento é mais pronunciado sobre o flanco do que na face, como mostra a **Figura 11**, lado direito.

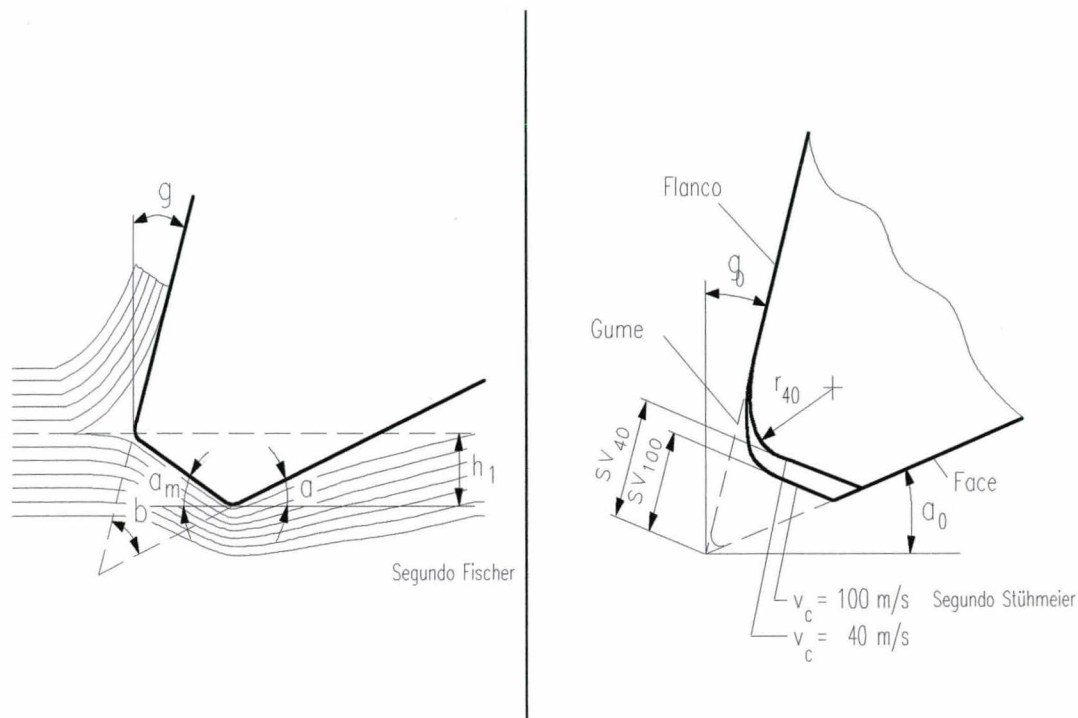


Figura 11 – Grandezas significativas do desgaste da ferramenta no fresamento de madeiras maciças e de seus compostos.

O desgaste de cratera não ocorre no uso de materiais comparativamente mais duros de ferramenta como, por exemplo, para metal duro.

Investigações de Fischer [1979] e Bonac [1982] resultaram, que ferramentas de metal duro na usinagem de materiais de peças iguais apresentaram sempre o mesmo tipo de desgaste, que se deixa caracterizar através do chamado *Microângulo de incidência de flanco* (*Microfreiwinkel*). Fischer [1989] desenvolveu também com base nesses conhecimentos um programa atual do modelo do desgaste da ferramenta de corte. Neste caso foram observados grandezas significativas o desgaste do gume h_1 e o *Microfreiwinkel* α_m (**Figura 11**, lado esquerdo).

2.7. GRANDEZAS DE SAÍDA

As grandezas de saída são decisivas para a aplicação industrial de uma nova tecnologia ou para implementar alterações em um processo de usinagem. Somente se garantidas as condições mínimas de qualidade de um processo e de produtividade, os empresários, de acordo

com as teorias econômicas de mercado, poderão introduzir novas máquinas-ferramentas ou tecnologias de produção.

No processamento de madeira, a estrutura da superfície é considerada como uma das mais importantes características de qualidade [SCHADOFFSKY, 1995].

As qualidades tribológicas, como observados principalmente nos pares deslizantes de elementos metálicos, são insignificantes para elementos ou produtos de madeira. Exceções formam superfícies com função técnica, como perfis de forma com juntas coladas (como, por exemplo, conexão com cauda de andorinha e dente de serra), onde uma determinada aspereza da superfície como parâmetro de qualidade é essencial.

A função da superfície de madeira maciça é de natureza principalmente estética. Para muitos produtos da indústria moveleira, a superfície de um móvel ou componente de madeira é de função decisiva para a aceitação do mercado. Além da cor, a geometria da superfície é o principal elemento que influencia a percepção manual e visual dos clientes.

O cumprimento das funções atribuídas a uma superfície técnica exige que a mesma possua certas propriedades, que por sua vez, podem ser divididas em dois grupos. O primeiro grupo compreende as propriedades relacionadas com a integridade da superfície (alterações sub-superficiais) e o segundo grupo compreende as propriedades geométricas da superfície (rugosidade). O termo *textura* é o mais utilizado no estudo das propriedades geométricas de uma superfície e será aqui adotado, mas não é raro também se encontrar na literatura o termo *topografia* ou *microtopografia*.

O estudo completo do comportamento de uma superfície técnica implica na análise simultânea das propriedades relativas à integridade e à textura (IHD1997).

A tecnologia de superfícies da madeira além de assegurar a qualidade do produto serve, também, para monitorar o processo de usinagem, ferramentas de corte e a máquina-ferramenta. A qualidade das superfícies de madeiras maciças como avaliação objetiva e reproduzível foi e ainda é um grande problema tanto na pesquisa quanto na produção. A qualidade da superfície é dependente de um grande número de parâmetros.

Fischer [1994] descreve a dificuldade de se avaliar objetivamente uma superfície de madeira, pois os resultados de trabalho de uma superfície fresada são diretamente dependentes dos elementos estruturais gerados pelo processo de usinagem com remoção de cavaco como, por exemplo, a influência do avanço, máquinas usadas, do material e do estado da ferramenta e,

principalmente, da estrutura dispersa e específica da madeira que está diretamente relacionada com a espécie empregada.

Fatores não funcionais, porém muito importantes para a indústria moveleira, são influenciados pela textura da superfície, não só pela magnitude da rugosidade mas também pela microestrutura da superfície. Destacam-se a aparência e a sensibilidade ao toque. No chão de fábrica, a evolução da superfície da madeira ainda toma lugar pelo toque manual e exame visual, os quais, é claro, não podem fornecer resultados reproduzíveis. Tais resultados são necessários, ainda assim, para estabilizar os sistemas de controle automático.

Outro ponto da estimativa da superfície é a avaliação indireta do processo de usinagem, das ferramentas ou do estado de usinagem (vibrações). A textura de uma superfície pode ser utilizada para determinar se a ferramenta utilizada na sua geração está dentro dos limites de operacionalidade. O exemplo mais comum é a avaliação de desgaste das ferramentas em função da peça usinada [DINIZ, 1992], [MARIOLAN, 1992] e [TAYLOR, 1963]. A textura é também um dos critérios aplicados na avaliação da usinabilidade, citado por [STEMMER, 1994], [FERRARESI, 1977] e [MICHELETI, 1977]. Por isto, as características específicas da madeira como marcas de dentes de ferramentas são levadas em consideração para a estimativa. Com a ocorrência de fibras levantadas depois de fresadas, não somente o processo de fresamento deve ser otimizado, é necessário, também, uma operação subsequente podendo ser controlada dependendo dos resultados medidos. Com o resultado correspondente do polimento, a quantidade de verniz a ser distribuído na superfície pode ser reduzido, ou pode ser feito sem verniz de polimento. A classificação das marcas de dentes no fresamento pode ser usado para monitorar as ferramentas, assim como para o controle das trocas de ferramentas. Por causa do baixo requerimento na resolução da medição em uma das mãos, mas com alta velocidade de medição na outra mão, os sensores terão que se adaptar de modo apropriado.

Partindo-se, então, do pressuposto de que a tecnologia de superfície desempenha um importante papel tanto no controle do processo como na otimização da etapa de acabamento do produto final, tem-se como caminho natural e necessário o aprimoramento dos instrumentos e procedimentos de medição, bem como dos parâmetros de quantificação da textura e da integridade superficial.

2.7.1. TEXTURA SUPERFICIAL

Mesmo com todo o conhecimento acumulado na quantificação e na medição de textura de superfícies para metais, muito ainda há de se fazer para madeiras maciças. Não só para acompanhar os constantes desenvolvimentos das máquinas-ferramentas e dos processos de fabricação, bem como sua otimização, mas também para se consolidar o emprego de novas alternativas de madeira maciça oriundas de floresta plantada no mercado internacional de móveis.

Um revisão do estado da arte sobre a medição da rugosidade de superfícies de madeira maciça foi realizada por Westkämper e Riegel [1992] e Westkämper e Schadoffsky [1995].

O acabamento superficial é um fator muito importante para operações de usinagem, pois está relacionado com o controle final da forma da peça. Através do processo de usinagem não é possível produzir superfícies ideais. Quando observa-se uma peça no microscópio pode-se observar que sua superfície é dotada de regiões com maior ou menor planicidade que é definido como sendo rugosidade da peça, mesmo que sob o aspecto macroscópico sejam consideradas “lisas”. No perfil real de um componente de madeira maciça podem ser encontrados seis tipos diferentes de desvios que são gerados em função de causas bem específicas dentro de um processo de fabricação da superfície de um componente e que são caracterizados pelas suas formas geométricas. Na **Figura 12** [DIN4760] são apresentados os desvios de primeira a sexta ordem, bem como as suas principais fontes geradoras.

Estes desvios, embora com características distintas, não se encontram nitidamente separados. De fato, eles se sobrepõem formando o perfil completo. Em regra geral, o software integrado ao aparelho de medição de rugosidade possibilita a separação (filtragem) em um perfil de rugosidade e outro perfil de ondulação.

A influência de diferentes parâmetros na textura superficial do elemento fresado de madeira maciça pode ser distinguida segundo as causas de deformação entre a rugosidade estrutural, a rugosidade condicionada a técnica de fabricação, e a rugosidade cinemática [HEIKRON, 1996]. As componentes de rugosidade estão uma sobreposta a outra.

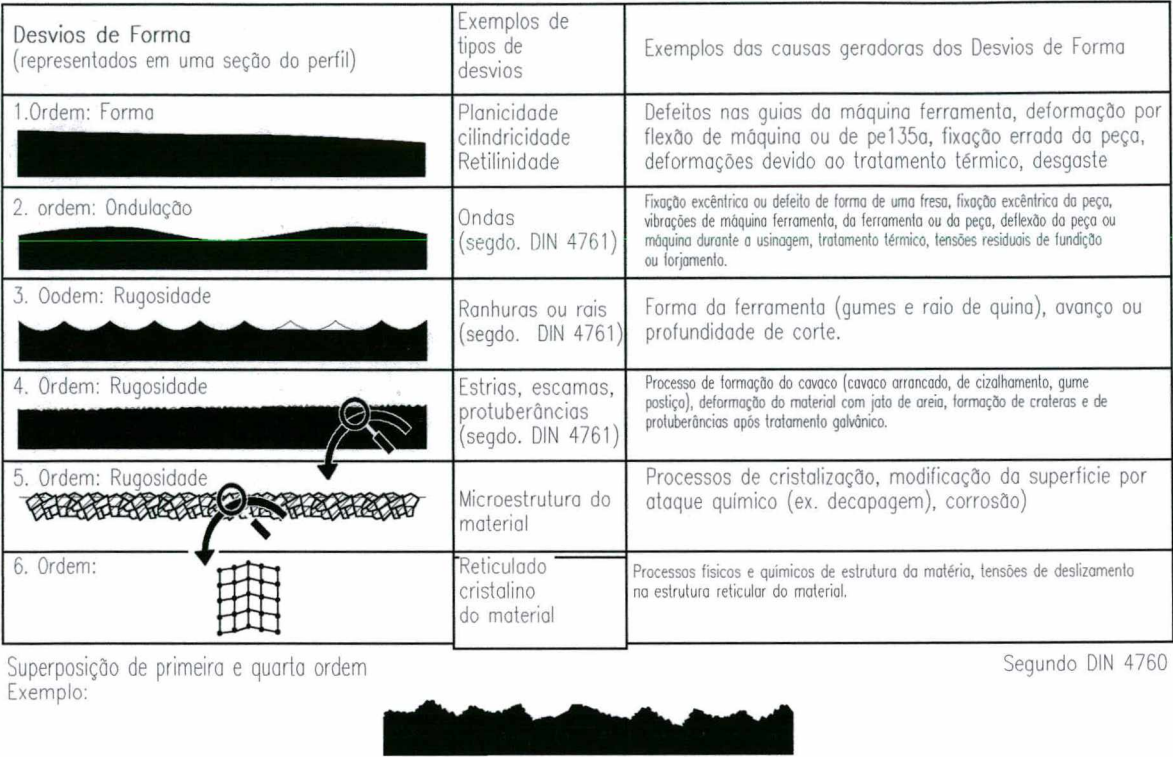


Figura 12 – Desvios de forma do perfil de uma superfície (DIN4760).

A *rugosidade estrutural* é dada através das características de heterogeneidade da madeira. Esta apresenta-se através da porosidade superficial aparente, bem como nas diferenças das regiões de lenho inicial das de lenho tardio.

A *rugosidade condicionada a técnica de fabricação* será determinada através do ângulo de cunha, bem como do estado de desgaste do gume da ferramenta, e apresenta-se na superfície da camada interna, cuja estrutura celular é alterada durante a usinagem.

A *rugosidade cinemática* é causada por irregularidades geradas pela ação da ferramenta na superfície da peça devido a combinação do movimento de corte e de avanço, e a qualidade do acabamento superficial desta peça usinada irá depender da geometria da ferramenta, das condições de corte, do comportamento dinâmico da máquina-ferramenta e materiais da ferramenta e da peça. O comportamento do ataque do gume da ferramenta apresenta-se para o fresamento periférico em forma de arco ciclóide (rugosidade de 3. Ordem) sobre a superfície da peça gerada, que está diretamente relacionado com o avanço, que pode ser calculado pela equação [BORATYNSKY, 1990]

$$t_u = 0,5.d.\left[1 - \cos\left(\arcsin \frac{f_z}{d}\right)\right] \quad (19)$$

Enquanto que para a superfície gerada pelo gume da ferramenta no fresamento de topo é dado então pela equação:

$$t_s = f_z \cdot \sin(\chi_r' + \lambda_{wz}) \quad (20)$$

Comumente, o acabamento superficial, mais especificamente a rugosidade, é menor quando as vibrações geradas durante o processo de usinagem devido aos esforços mecânicos são baixas.

O controle da textura superficial tem sido uma das fontes de trabalhos científicos para estudiosos. Alguns pesquisadores Jiang e Xu (1987) e Akihiko e Fujita (1989) estudaram a correlação entre a vibração e a vida da ferramenta. O monitoramento da vibração das ferramentas para o controle de desgaste pode ser aplicado também ao controle da rugosidade e, portanto, pode-se estabelecer o fim de vida da ferramenta baseado na qualidade da superfície gerada. Segundo Schowckry (1982), geralmente consegue-se razoável rugosidade combinando-se pequenos avanços e altas velocidades de corte. Com relação a influência exercida pelo desgaste de flanco sobre a rugosidade, Bonifácio e Diniz (1994), afirmam que após um pequeno tempo de usinagem a rugosidade diminui e quando o desgaste de flanco está em um estágio avançado, a rugosidade tende a aumentar consideravelmente, observações também feitas por Sudaram e Lambert (1979). Segundo estes pesquisadores, após um pequeno espaço de tempo de corte ocorre o arredondamento do gume da ferramenta ocasionando a melhoria do acabamento superficial e neste estágio o desgaste de flanco não é suficiente para provocar o aumento da rugosidade. Com o decorrer do tempo, o desgaste de flanco eleva-se a níveis consideráveis provocando o aumento dos valores de rugosidade da superfície usinada.

A rugosidade de trabalho é resultante portanto da projeção do gume da ferramenta sobre a peça e da deformação da estrutura do material da peça, que freqüentemente pode ser provocado pela fixação da ferramenta não adequada ou do excessivo desgaste do gume. Aqui trata-se, por exemplo, do levantamento ou do arrancamento das fibras, esmagamento das fibras em lugar do corte, aspereza da superfície (estrias) e outras irregularidades.

Existe a necessidade de critérios objetivos de evolução da textura superficial no processo de fabricação. A geometria da superfície é decisiva para a qualidade dos produtos e é testado, por

exemplo, no processo em série de montagem de móveis por toque manual e exame visual. Não existem normas para a avaliação das superfícies de produtos de madeira. Os resultados dos métodos atualmente usados na indústria moveleira correspondem a um julgamento subjetivo de especialistas.

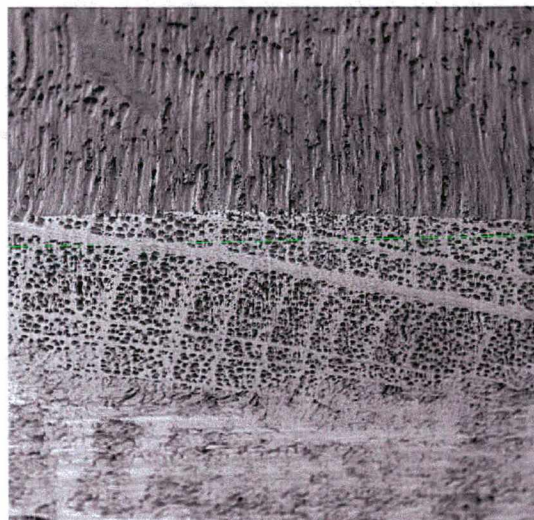
A causa disto são os poros, como mostrados na **Figura 13**. Os poros da estrutura aparentemente desordenada do material, que avançam para uma elevada e extensa rugosidade específica da madeira. Dependendo da quantidade e do diâmetro dos poros, as características anatômicas da madeira avançam para um aumento dos valores da rugosidade. Portanto, verificações comparativas com diferentes espécies de madeira mostram valores característicos que são possíveis. Frequentemente, a rugosidade específica da madeira é maior que a rugosidade decorrente dos processos de usinagem.

Desta forma, o controle pode ser determinado pela medição de alguns parâmetros. Entre estes, para a madeira os mais importantes são o parâmetro vertical de rugosidade R_z e os parâmetros de forma derivados da curva de suporte do perfil (Curva de Abbott-Firestone), seja R_k , R_{vk} , e R_{pk} .

R_z só não traz informações sobre a existência ou não de picos. Mas R_z combinado com R_{max} traz muitas informações. Se R_z for aproximadamente igual a R_{max} a superfície é regular. Se R_z for muito menor que R_{max} , significa que existem elevações esporádicas na superfície.

R_a , o parâmetro mais conhecido, aceito e aplicado mundialmente para a avaliação da superfície de metais, não é recomendado para madeira maciça, pois ele representa uma média, o aparecimento de um pico ou um vale não típico pode mudar substancialmente o seu valor, não representando mais o valor médio da superfície. Além disso, o valor de R_a não traz nenhuma informação a respeito da forma do perfil, portanto podendo ter o mesmo R_a para perfis bastante distintos. R_a também não é indicado para processos de fabricação de madeira maciça, que geram perfis com frequência elevada de picos e vales, pois as distorções causadas pelos filtros eleva o erro a níveis inaceitáveis.

R_z [DIN4768] é mais sensível a picos ou a vales do que R_a , mas também não transmite nenhuma informação sobre a forma do perfil. É entretanto muito útil na comparação entre duas superfícies oriundas de um mesmo processo de fabricação, ou seja, é útil para o monitoramento de processos de fabricação.

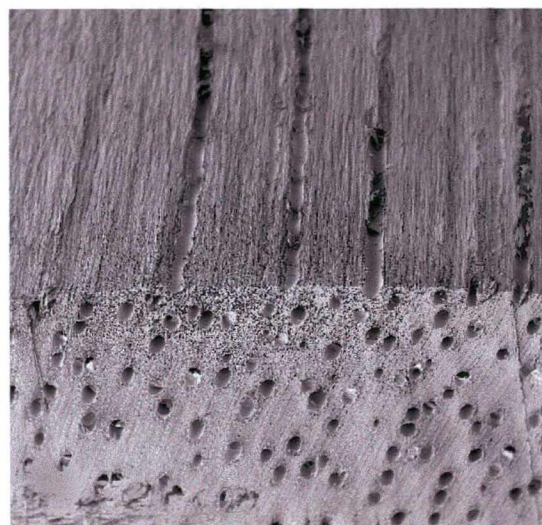


Rotbuche

Ampliação: 20 X

$l_f = 1400 \text{ m}$

$f_z = 1,5 \text{ mm}$

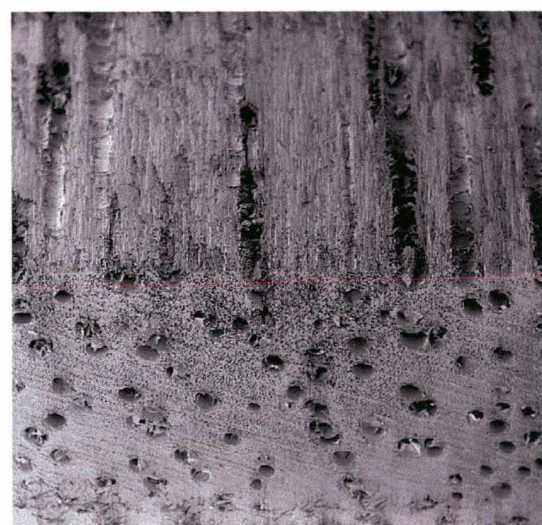


E. dunnii

Ampliação: 20 X

$l_f = 1400 \text{ m}$

$f_z = 1,5 \text{ mm}$



E. grandis

Ampliação: 20 X

$l_f = 1400 \text{ m}$

$f_z = 1,5 \text{ mm}$

o  339-71-01

Figura 13 – Estrutura microscópica para diferentes tipos de madeira.

R_k , R_{vk} , e R_{pk} [DIN4776] permitem uma análise mais detalhada sobre a geometria do perfil e são obtidos a partir da curva de suporte e da curva de densidade das amplitudes do perfil, as quais por si só já fornecem informações qualitativas importantes. A aplicação básica destes parâmetros se dá onde a macrogeometria (fibras) e a microgeometria (poros) da peça são fundamentais para a análise da superfície usinada.

Westkämper e Riegel [1993] correlacionam os parâmetros funcionais de medição de rugosidade da curva de Abbott com a estrutura da madeira usinada que são divididos em três regiões.

A região de picos dada por R_{pk} (altura reduzida dos picos, *Reduzierte Spitzenhöhe*, *Reduced peak height*) está relacionada com as fibras, especificamente os *fibrotraqueídeos* da madeira. Na fabricação de superfícies deve-se manter o valor de R_{pk} o menor possível, diminuindo ao máximo a fase de estabilização. Este parâmetro determina o tempo de lixamento necessário a obtenção de níveis de rugosidade exigida na última etapa do processo de acabamento, ou seja, o desgaste que a superfície sofre inicialmente até que se estabeleça uma superfície de acomodação, isto é, de suporte estável.

A região de rugosidade central R_k (profundidade da rugosidade central, *Kernrauhtiefe*, *Core roughness depth*), que identifica a estrutura de trabalho é sobreposta pela estrutura anatômica básica formada pelos parênquimas radiais (raios). É onde ocorre a maior concentração de material e, portanto, R_k deve ser o menor possível, garantindo uma superfície suficientemente lisa dentro dos padrões aceitáveis de qualidade do cliente final.

A região de vales R_{vk} (Profundidade reduzida dos vales, *Reduzierte Riefentiefe*, *Reduced valley depth*), caracterizada pela porção do perfil que está abaixo da região de rugosidade central, nas angiospermas dicotiledôneas de alta e média densidades, são formadas pelos poros. Com essa informação é possível prever o volume de material retido pela superfície na operação de acabamento final.

Estas considerações a respeito de R_k , R_{vk} , e R_{pk} são utilizadas integralmente no processo de fresamento de madeiras maciças de angiospermas dicotiledôneas. Com esses três parâmetros é possível quantificar os valores de rugosidade para madeira maciça para muitas das aplicações na indústria moveleira.

Os instrumentos de medição não conseguem captar todas as características e irregularidades da superfície, apresentando como resultado o que se denomina de superfície efetiva, a qual é uma aproximação da superfície real. Sachsse [1994] confirma o processo de

apalpamento mecânico da superfície como o melhor método de caracterização de uma superfície de madeira maciça, pois permite o processamento de todos os parâmetros tradicionais importantes da medição da rugosidade.

Entretanto, as desvantagens da utilização desses parâmetros tradicionais sem critério de avaliação específicos, sem o conhecimento exato dos filtros e dos valores algoritmos, assim como das características anatômicas da madeira, incorre em erros, não permitindo a comparação de medidas de rugosidade realizadas em diferentes tipos de madeira, pois os instrumentos de medição, por sua vez, não conseguem captar todas as características e irregularidades da superfície, apresentando como resultado o que se denomina de superfície efetiva, a qual é uma aproximação da superfície real. A diferença entre o perfil real e efetivo depende essencialmente do método e do sistema de medição.

O maior ponto de desenvolvimento de um método objetivo de evolução da textura no controle do processo de fabricação tem que ser a identificação das características específicas da madeira e da correspondente área de superfície, onde será realizada a avaliação da rugosidade produzida na usinagem, bem como a diferenciação entre marcas individuais produzidas no processo de usinagem e características diferenciadas das superfícies, assim como suas funções. Schadoffsky [SCHADOFFSKY, 1996] desenvolveu um método, que foi testado no IWF-Braunschweig, no qual pode mostrar separadamente as características topográficas originais da anatomia da madeira e do processo de usinagem através de imagens processadas.

A **Figura 14** mostra alguns resultados da rugosidade durante o fresamento. As sete diferentes espécies de madeira são fresadas sob parâmetros de processos e condições de uso de ferramentas iguais. A primeira fila representa os valores de R_z da rugosidade produzida na usinagem; na fila de trás mostra os valores da rugosidade produzidas na usinagem associadas a rugosidade específica da madeira. Além disso, as superfícies usadas estão limpas de marcas de polimento; os valores da rugosidade, incluindo a rugosidade específica da madeira e por espécies de madeira com grandes poros, em parte dispõe consideravelmente de um valor acima da rugosidade produzida na usinagem.

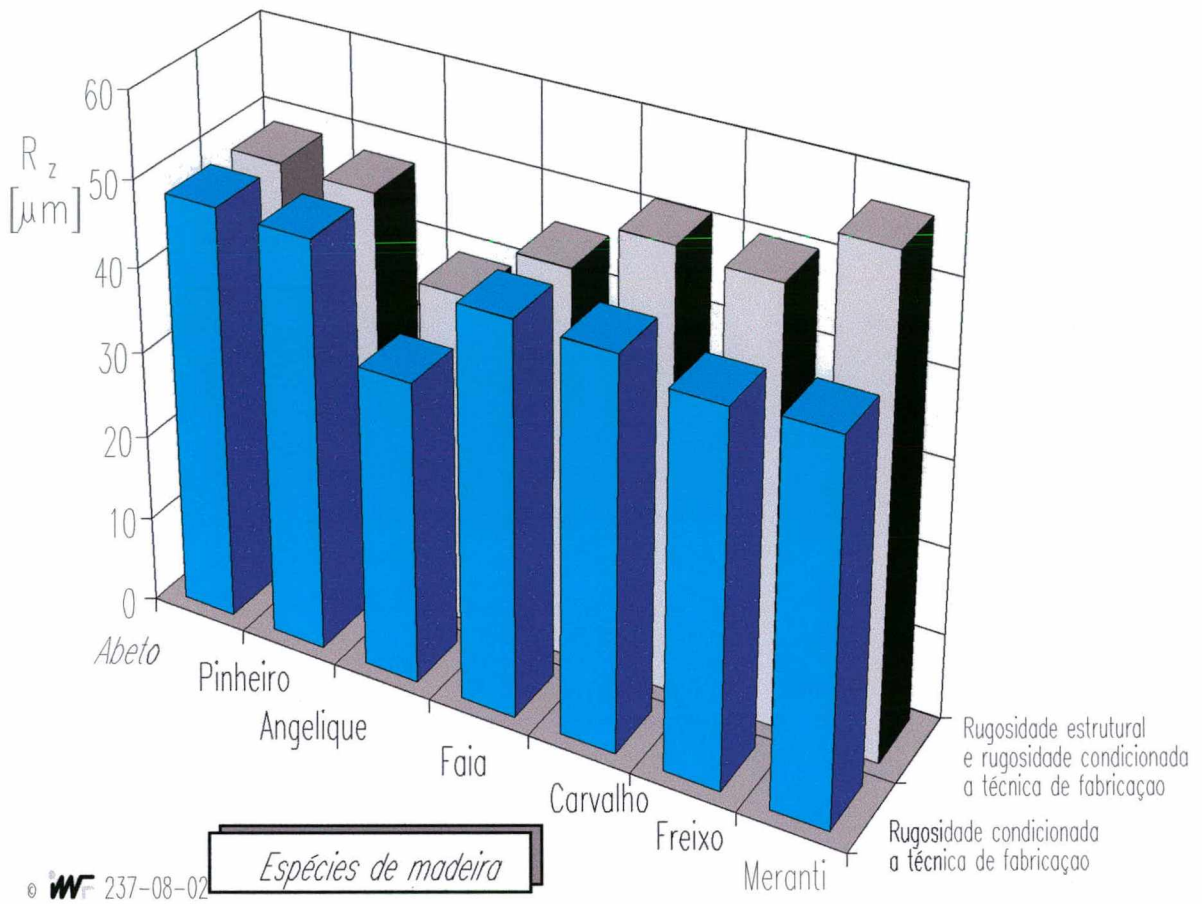


Figura 14 – Rugosidade superficial R_z para diferentes espécies de madeira sob os mesmos parâmetros de usinagem (Schadoffsky, 1997) .

A evolução da geometria da superfície da madeira baseada em duas dimensões da superfície é vantajosa, por que as características específicas da madeira e características produzidas na usinagem podem ser classificadas com o método convencional seguindo a Norma ISO. O método permite uma evolução da textura superficial, que são marcadas pelo processo de usinagem empregado. A rugosidade específica da madeira de diferentes espécies analogamente ao julgamento manual/visual feito por especialistas permanece sem nenhuma influência nos resultados da evolução. O método permite comparação das medidas nas diferentes espécies de madeira. O conhecimento do número e tipos de características específicas de usinagem permitem o desenvolvimento de máquinas-ferramentas e processos.

O controle de qualidade pode ser estabilizado sem a produção rápida, e o processo de produção completo pode ser otimizado.

A rugosidade na superfície de um produto de madeira pode ser então observado da seguinte maneira:

- monitorando as máquinas / ferramentas: é possível monitorar indiretamente as vibrações das máquinas tão bem como as ferramentas usadas e levar os passos correspondentes para a troca de ferramentas:
- abrir e fechar processos de sistemas controlados para a fabricação de móveis, e controlar a aplicação de verniz dependendo da rugosidade da superfície após o fresamento/polimento; e,
- controlar a qualidade dos produtos (verificando a quantidade de verniz e características topográficas produzidas na fabricação).

2.7.1. INTEGRIDADE SUPERFICIAL (ALTERAÇÕES SUBSUPERFICIAIS)

Vários experimentos tem demonstrado que a textura é apenas uma parte do todo a ser considerado [SME1987]. Alterações físicas debaixo da superfície de madeiras maciças tem uma forte influência sobre o consumo de produtos de revestimentos orgânicos constituídos por seladores, tingidores, vernizes, fundos, massas, e outros produtos. O estudo destas alterações físicas, que geram diferentes propriedades tecnológicas, podem ser de ordem mecânica, térmica, química, elétrica ou biológica, e pertencem ao campo da *integridade superficial*.

Um parâmetro de especial influência sobre a qualidade funcional da superfície foi utilizado por FISCHER [1994]. Trata-se da profundidade de deformação d_t . Ela fornece a espessura da camada remanescente deformada sob a superfície da peça. A influência desse parâmetro sobre a função depende dos objetivos da aplicação, que podem ser a união de duas superfícies de madeira com cola ou a camada de uma superfície recoberta com revestimentos orgânicos, com o conseqüente inchamento da camada deformada.

A modificação da microestrutura é um desvio de forma de sexta ordem, onde a microestrutura do material é provocada pelo desgaste da ferramenta e só poder ser analisada com o auxílio de um microscópio.

Alterações físicas abaixo da superfície tem uma forte influência sobre o desempenho em serviço dos componentes de madeira maciça, principalmente quando os mesmos estão submetidos a esforços muito elevados ou à ambientes muito agressivos. As alterações físicas geram diferentes propriedades tecnológicas, que naturalmente, exercem grande influência no desempenho funcional de uma superfície técnica, principalmente no que se relaciona a vida de um componente.

A evolução da deformação das camadas subsuperficiais [WESTKÄMPER, 1997] servem para controlar a qualidade dos produtos (verificando a quantidade de verniz e características topográficas produzidas na fabricação), bem como para o monitoramento da vida da ferramenta.

3. OBJETIVOS DO TRABALHO

O BRASIL precisa de uma engenharia na área moveleira moderna comprometida com os programas mundiais de meio-ambiente, que regem o mercado globalizado, que consiga integrar efetivamente as necessidades industriais ao mercado internacional o segundo mais importante setor produtivo brasileiro em termos de capacidade de emprego – o setor moveleiro e de artigos de madeira.

É reconhecida a grande importância do melhoramento genético para o desenvolvimento do setor florestal. Os progressos alcançados, principalmente em produtividade, são expressivos e, hoje, busca-se a interação perfeita entre matéria-prima e qualidade do produto final através do trabalho conjunto dos setores de produção florestal e industrial. Dependendo do produto a ser obtido, as árvores terão que apresentar características adequadas e distintas, o que faz com que as técnicas e métodos de melhoramento empregados para móveis, sejam diferentes daqueles utilizados para carvão ou celulose. Assim, para que se possa estabelecer um programa de melhoramento genético florestal, é importante que o setor industrial tenha bem definido os parâmetros de qualidade e sua grandeza, ideais para a obtenção de um determinado produto final [PIRES e PAULA,1997].

As variações na qualidade de madeira para a produção de móveis, artigos de madeiras ou para a construção civil podem ser intensas quando são consideradas diferenças em nível de procedências, local, clima, solos, idade e técnicas de manejo florestal [NIEMZ, 1993].

O tipo de madeira influencia a usinabilidade e também a possibilidade de otimização do processo. Porém o número de publicações técnicas não é grande, onde os diferentes tipos de madeiras e de seus derivados são comparativamente relacionados com suas limitações. Este trabalho procura ampliar o conhecimento sobre os diferentes fatores de influência do tipo de madeira sobre o desgaste da ferramenta, as forças de usinagem e o acabamento superficial. Em especial, deve ser determinado, qual dos tipos de madeiras potenciais como substitutos de madeiras tropicais e subtropicais com suas características específicas que conduzem para a elevação do rendimento do processo, oferecendo dados tecnológicos importantes que contribuiriam tanto para o desenvolvimento do setor florestal como do setor industrial brasileiro.

A tendência atual de substituição das madeiras nativas de florestas tropicais e subtropicais pela utilização de madeiras de floresta plantada foi provocada pela pressão por parte dos grupos ambientalistas, pela manutenção da competitividade e, ainda, pelo aumento dos custos da madeira nativa, causados pela grande distância entre as áreas de plantação e o mercado consumidor, que implicam em elevados custos do transporte.

A melhoria da competitividade dos produtos florestais brasileiros no mercado internacional só pode ser atingida pelo atendimento as exigências ambientais através dos sistemas de certificação e de legislação ambiental, pelo reconhecimento das boas características tecnológicas das novas madeiras, bem como pela reestruturação da política governamental ligada ao setor florestal, principalmente do segmento moveleiro que possui o potencial de agregar maior valor aos produtos se associado a um novo *design* e ao emprego de modernas tecnologias, que permitem a obtenção de elementos com textura superficial exigida pelo mercado destes produtos.

A possibilidade para a concretização de novas oportunidades de negócio na área florestal brasileira é o reconhecimento pelo mercado internacional das excelentes características tecnológicas das novas espécies de madeiras oriundas de floresta plantada. Tais madeiras são denominados pelo mercado europeu e americano de madeiras alternativas por serem consideradas as substitutas naturais das madeiras nativas oriundas das florestas tropicais e subtropicais, em função da política internacional de desenvolvimento sustentado.

Do ponto de vista prático, muitos dos atuais problemas industriais podem ser resolvidos através do emprego correto de tecnologias modernas, já que com isto teria-se a possibilidade de fabricação dos elementos de móveis com melhor precisão e com geometria complexa imposta pelos *designer*, e, ao mesmo tempo, com possível redução nos custos de fabricação e maior segurança na produção.

O emprego da tecnologia de fresamento conjugado de topo e periférico em altas velocidades atende a estas exigências e deve-se, em princípio, atingir o seguinte objetivo em pesquisas tecnológicas. Para uma constante velocidade de corte v_c , operando-se com a máxima rotação permissível pela máquina-ferramenta, analisar a influência do processo de usinagem sobre a qualidade do acabamento superficial gerado na peça pela variação do avanço f de acordo com os valores empregados na indústria. Deve-se obter, simultaneamente, uma elevação da qualidade superficial com a elevação das taxas de produção, exigências naturais do setor moveleiro.

A fabricação de componentes de madeira com elevado acabamento superficial somente pode ser obtido com o domínio dos fatores de influência sobre o resultado final de trabalho. Em uma área onde a evolução da textura (topografia) superficial, dito **rugosidade**, é, ainda, **avaliada através da inspeção visual e do tato no chão de fábrica**, se faz realmente necessário conhecer através de pesquisas tecnológicas desenvolvidas em institutos de pesquisa fidedignos, que fatores como as condições do meio ambiente, vibrações, parâmetros de usinagem, condições gerais de trabalho, estado da ferramenta, material da ferramenta, comportamento da máquina-ferramenta, e, no caso de madeiras, a espécie, a densidade, a umidade da peça de madeira, a orientação das fibras, entre outros, exercem sobre a qualidade final da peça. Uma caracterização do processo de fabricação com base apenas nos dados teóricos e sem uma caracterização tecnológica da madeira não é possível em função da grande quantidade de fatores de influência.

A indústria moveleira brasileira para se manter competitiva no mercado globalizado necessita assim de dados tecnológicos sobre a usinagem destas madeiras alternativas „*Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunni*“ - madeiras com importância crescente na fabricação de elementos de móveis para a exportação - empregando estas novas tecnologias para poder trabalhar em condições econômicas e de qualidade assegurada que devem permitir uma melhoria do processo produtivo, bem como o desenvolvimento de novas máquinas-ferramentas e ferramentas. Desta maneira, faz-se necessária uma análise sistemática do comportamento destes materiais para as diferentes condições de usinagem. Os elementos são não somente para produtos acabados como também, em larga escala, para partes, peças, componentes e produtos semi-elaborados.

Com o objetivo de verificar o comportamento das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunni* durante o processo de fresamento (periférico e de topo conjugados) com elevada velocidade de corte empregando ferramenta de metal duro, é planejada uma pesquisa sistemática da influência do avanço sobre a textura superficial do elemento de madeira gerado para o corte longitudinal (tangencial) das fibras. Com base nos resultados obtidos, devem ser determinados o parâmetro mais adequado para os ensaios de vida da ferramenta em cada uma das madeiras ensaiadas e analisada com profundidade a influência que as variáveis do processo têm sobre o resultado final de trabalho.

A influência das variáveis de trabalho sobre a evolução da textura (topografia) superficial, especialmente, os valores de rugosidade segundo a curva de Abbott, é o mais importante parâmetro para os segmentos moveleiro e de artigos de madeira, tanto para o controle

automático do processo como para a etapa de acabamento. Serão analisados os valores de rugosidade detalhadamente para estas espécies.

A justificativa da importância desta análise é dada pela necessidade de uma objetiva **avaliação dos critérios**, já que não existem Normas para a avaliação das superfícies geradas pelo processo de usinagem, sobre os métodos usados na indústria moveleira, que correspondem a um julgamento subjetivo de especialistas em somente casos especiais. A necessidade de informações tecnológicas é premente no controle de qualidade dos elementos de madeira no processo em série de montagem de móveis feita, atualmente, manualmente e através da inspeção visual.

Para a **garantia dos resultados no escopo desse trabalho** serão comparados entre si a respeito de suas características de usinabilidade os três tipos de madeira: uma alemã, *Fagus sylvatica* (Rotbuche – adquirida no mercado madeireiro alemão e material de referência para a pesquisa) e duas brasileiras *Eucalyptus grandis* (oriunda da Empresa Florestal Klabin Florestal - PR) e *Eucalyptus dunnii* (oriunda de Florestas para o desenvolvimento de Pesquisas Florestais da EMBRAPA - PR).

Os ensaios são planejados para o processo de fresamento (fresamento periférico e de topo conjugados) no sentido longitudinal (tangencial) as fibras, que é o processo de usinagem mais importante para a indústria moveleira. Como ferramenta deverá ser utilizada uma fresa de gume único com metal duro K 05 (HL 05 – material de ferramenta internacionalmente utilizado pelo setor moveleiro) para aplicação em fresadoras de topo, com objetivo de viabilizar a medição das forças de usinagem. Deverão ser medidos as forças de corte e de avanço, a rugosidade da ranhura fresada, bem como o desgaste da ferramenta na face da ferramenta.


As componentes de força de usinagem de madeiras de *Eucalyptus* oriundas de florestas subtropicais praticamente, até o momento, não foram pesquisadas. As forças durante a usinagem permitem aprofundar os conhecimentos sobre os fenômenos que regem o processo de corte. Para que isto seja possível é necessário, entretanto, determinar uma estratégia de medição para elevadas frequências, ou seja, com o sistema de medição existente medir as forças médias e através de equações matemáticas determinar as forças máximas durante a usinagem.

A **tabela 2** mostra a descrição dos parâmetros de usinagem utilizados no desenvolvimento dos ensaios sistemáticos no processo de fresamento em alta velocidade de corte para madeiras de Eucalipto de florestas plantada do sul do Brasil.

Tabela 2: Descrição dos parâmetros de usinagem

Ferramenta: HM HL 05 $\lambda = 0^\circ$ $\gamma = 0^\circ$ $\gamma_e = 41,4^\circ$
 $n = 15600 \text{ min}^{-1}$ $v_c = 65,4 \text{ m/s}$ $d = 80 \text{ mm}$
 $z = 1$ $a_p = 10 \text{ mm}$ $a_e = 10 \text{ mm}$ $l_c = 28,9 \times l_f$

$v_f \text{ [m/min]}$	8,0	12,8	15,6	23,4	31,2
$f_z \text{ [mm]}$	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0
h_{max}	0,33	0,53	0,66	0,99	1,32
h_m	0,18	0,28	0,35	0,53	0,71

 339-75-01

A proposta tem como objetivo fornecer dados comparativos das características de usinabilidade tanto para a indústria moveleira da Alemanha como para o Brasil. Os dados obtidos neste estudo serão disponibilizados para a indústria fabricante de máquinas ferramentas, bem como para os usuários destas, além de contribuir para o aumento da utilização destas espécies pelo setor moveleiro.

A investigação será desenvolvida na Alemanha, no Instituto de Máquinas Ferramentas e Processos de Fabricação (setor de tecnologia de usinagem de madeiras) da Universidade Técnica de Braunschweig, centro de excelência a nível mundial na área de usinagem de madeiras, onde se procurará também de forma coerente e formal comprovar a substituição da madeira nativa de florestas tropicais e subtropicais do Brasil por madeiras de floresta plantada como fonte de matéria-prima para a indústria moveleira alemã e brasileira, segundo a concepção ambiental e o domínio de parâmetros tecnológicos.

A evolução das questões ambientais internacionais, que levaram o surgimento da necessidade do desenvolvimento do setor florestal brasileiro e catarinense para atender as exigências de um mercado globalizado inserido nas novas tendências de desenvolvimento

sustentado, que consequentemente promoveu o emprego nos seus diversos segmentos de novas espécies de madeira de origem de floresta plantada serão também abordados no **ANEXO 1** deste trabalho.

Ainda no **ANEXO 2** abordar-se-á os aspectos relativos a economia globalizada que exige mecanismos concretos para o aumento da competitividade em todos os níveis como, por exemplo, a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias e a formação de mão-de-obra qualificada capaz de pesquisar e gerenciar estas tecnologias e os novos modelos de sistemas organizacionais; a importância e a evolução do principal pólo moveleiro brasileiro – região de São Bento do Sul (SC); e, a percepção do governo brasileiro e das unidades de suporte ao ensino e a pesquisa para a formação de profissionais que atendam as exigências e demandas existentes deste importante setor produtivo.

4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de usinagem foram planejados para serem realizados com algumas madeiras de maior importância e maior potencial para a fabricação de artigos de madeiras e elementos para móveis de madeira maciça. Principalmente no campo de móveis ecológicos e “ecodesign” [GORGES-FARIAS, 2000] existe um grande interesse no desenvolvimento florestal de madeiras alternativas, especialmente em substituição as madeiras nativas de floresta tropical e subtropical. Até o momento, entretanto, existem relativamente poucas alternativas para o setor moveleiro, visto que as madeiras com boas características físicas, mecânicas e organolépticas são na maioria ou muito macias, ou muito duras, de modo que as precisões de fabricação não podem ser obtidas ou mantidas. Principalmente a imbuía, o mogno, a cerejeira e o pau marfim são empregados para estas aplicações, entretanto buscam-se alternativas a estes em função dos altos custos de transporte, o distanciamento crescente da fronteira florestal para o norte do país, as pressões ecológicas para o uso de recursos florestais renováveis, a alta produtividade das florestas plantadas, a ampliação do uso múltiplo das florestas e a segurança de abastecimento com matéria-prima homogênea.

Uma madeira ideal para o uso em artigos de madeira e elementos de móveis de madeira maciça é algo inexistente. Um material pode ter boas qualidades com relação algumas características desejáveis e propriedades menos adequadas em relação a outras. Em virtude disso, a escolha do melhor material para uma determinada aplicação é uma tarefa complexa. Devem ser levadas em conta não somente os aspectos de custo e a capacidade de automatização, mas também fatores como a facilidade de ser clonado, a resistência mecânica, a usinabilidade e a possibilidade de obter bons acabamentos superficiais e bons revestimentos, entre outros.

O desenvolvimento na obtenção de novos materiais com alta homogeneidade, como as madeiras oriundas de florestas plantadas de alto valor tecnológico vem ao encontro dos anseios dos fabricantes de elementos de madeiras e de móveis de madeira maciça, já que trazem uma alternativa as madeiras empregadas até o momento, como o mogno, por exemplo. Este, apesar de boas características mecânicas e organolépticas, tem alto custo e foi escolhido pelos ecologistas como o símbolo da preservação da floresta amazônica, possui portanto restrições a sua comercialização. Estas novas madeiras e suas características ainda são, entretanto, pouco

conhecidas, e os problemas de fabricação com o uso de tecnologias de fabricação em alta velocidade com ferramenta de geometria definida ainda não estão completamente dominados. Devido a isto, foram escolhidas para a análise das características de usinabilidade com ênfase para a força de usinagem e o acabamento superficial o *Eucalyptus grandis* e o *Eucalyptus dunnii*, bem como a *Fagus gustfólia*, por ser esta uma madeira já de largo emprego na fabricação de móveis na Europa e Estados Unidos.

A caracterização tecnológica, principalmente ensaios de usinabilidade, realizada em centros de excelência em tecnologia de usinagem de madeiras permite tanto o aumento da credibilidade pelo mercado internacional das alternativas propostas pelo setor florestal brasileiro como para o setor moveleiro poder trabalhar em condições econômicas e de qualidade assegurada que devem permitir uma melhoria do processo produtivo, bem como o desenvolvimento de novas máquinas-ferramentas e ferramentas. Ainda a definição por parte do setor industrial dos parâmetros de qualidade e sua grandeza, ideais para a obtenção de um determinado produto final, são fundamentais para promover um programa florestal mais eficiente de melhoramento genético.

Antes de se poder aplicar uma ou mais melhorias ao processo industrial, as relações interdependentes dos resultados do processo devem ser esclarecidos e acima de tudo a segurança do processo deve ser garantida.

Para os ensaios foram escolhidas madeiras de floresta plantada do sul do Brasil, visto que as madeiras de florestas nativas não podem mais servir de sustentação para o desenvolvimento econômico do Brasil, os quais devem procurar conservar os remanescentes (trabalhando tanto com ecossistemas como com espécies florestais cuja base genética vem sofrendo erosão acentuada) para promover a sua expansão.

As florestas plantadas são a alternativa para o desenvolvimento econômico e produção de derivados. Entretanto, é necessário que se promova a ampliação da base florestal em propriedades de pequenos e médios agricultores, criando alternativas para que indústrias de todos os portes possam comprar matéria-prima florestal de terceiros e não necessitem obrigatoriamente produzi-la [GORGES-FARIAS, 1999]. Se não houver um esforço conjunto de todos os setores da sociedade ocorrerá a escassez de áreas em idade de corte e deverá gerar consequentemente um aumento do preço da madeira e de produtos florestais. Isto é confirmado pela projeção da associação paranaense de reflorestadores. Usando a área plantada e um consumo de madeira com crescimento pequeno, existirá já a partir de 2002 uma falta de madeira de pinus no mercado da

região sul do Brasil. O déficit no abastecimento das indústrias da região sul poderá ser suprido pela importação de madeiras de outras regiões e/ou pela formação local de florestas com um ciclo de corte mais curto que o pinus. É nesse segundo caso que o eucalipto se encaixa. Há possibilidade de se produzir madeira de diâmetro apropriado para desdobro, em rotações a partir de 10 anos.

Pequenas serrarias são mais flexíveis para trabalhar com qualquer diâmetro, mas serrarias de maior nível tecnológico, mais automatizadas, exigem o uso de material mais homogêneo. Este é outro ponto favorável para o eucalipto. Podendo ser facilmente clonável, é possível produzir um grande número de toras muito semelhantes para uma mesma serraria.

O *Eucalyptus grandis* é atualmente a espécie mais promissora pelos seguintes motivos:

- maior área plantada dentre as espécies comerciais,
- trata-se da espécie mais difundida no Brasil em plantios comerciais,
- maior disponibilidade imediata de florestas em idade de corte, e
- madeira leve e de boa resistência mecânica.

A madeira de *Eucalyptus dunnii* possui grande importância pelas suas características organolépticas, principalmente, a relacionada a coloração clara, que permitirá aos decoradores a substituição de madeiras como, por exemplo, a de pau marfim.

A madeira de eucalipto apresenta custo de aquisição sensivelmente inferiores as de floresta nativa, sendo portanto economicamente viável, embora os defeitos ligados a tensão de crescimento sejam maiores se não são empregadas técnicas de silvicultura adequada, provocando os problemas de fabricação que freqüentemente são mais complexos que os de madeira nativa. Com um melhor conhecimento sobre sua natureza, formas de controle e dos parâmetros de qualidade e suas grandezas, o eucalipto pode vir a ser uma das principais alternativas para a indústria madeireira da região sul, onde estão localizados os principais pólos moveleiros do Brasil, responsáveis por 75% da exportação brasileira de móveis.

O desenvolvimento de novas tecnologias ou o domínio de tecnologias já existentes propiciarão um melhor aproveitamento da madeira de eucalipto por serrarias e indústrias de móveis. Os principais aspectos a serem abordados com maior conhecimento científico e tecnológico são os seguintes:

- caracterização da madeira de eucalipto,
- principais defeitos e as técnicas para mantê-lo dentro níveis aceitáveis.
- técnicas de desdobramento,
- programas de secagem,
- características de usinabilidade, e
- controle de qualidade dentro da indústria florestal.

O requisito básico para determinar se uma espécie de madeira é apta para um uso determinado é o conhecimento e análise de suas características de usinagem.

A realização de investigações científicas na usinagem de madeiras alternativas empregando materiais de ferramentas de metal duro, mais utilizados pelo setor moveleiro, e elevada velocidade de corte devem buscar uma diminuição do esmagamento das fibras com conseqüente melhoria da qualidade superficial para o corte longitudinal das fibras.

Um processo de usinagem, que sob condições de produção industrial deve transcorrer com boa qualidade de processo e economia, causa uma combinação livre de uma variedade de componentes.

4.1. MÁQUINA-FERRAMENTA

Os ensaios foram realizados para o processo de fresamento combinado de topo e periférico para o fresamento de uma ranhura em um elemento de madeira em uma fresadora CNC de topo da firma Reichenbacher modelo Ranc 740 H, **figura 15**.

A máquina construída na forma de portal é especial para a usinagem em altas velocidades. Para a correspondente rigidez, permite no eixo horizontal um velocidade de avanço de até 60 m/min. No cabeçote da fresadora foi montada uma moto-árvore de alta frequência do tipo ESC 70124M (Fa. Precise Präzisionsspindeln GmbH) com uma potência máxima de 12 kW para $n = 18.000 \text{ min}^{-1}$. O fuso era lubrificado por névoa de óleo e controlado por meio de um regulador de frequência Refu 316/15 .

Para limitar as forças resultantes do desbalanceamento (vibrações, força centrífuga, forças no mancal), foram fixadas os valores de desbalanceamento adicional estático e dinâmico segundo as normas [DIN 847] [ISO 1940]. Precauções especiais para um balanceamento rápido e seguro são necessários.

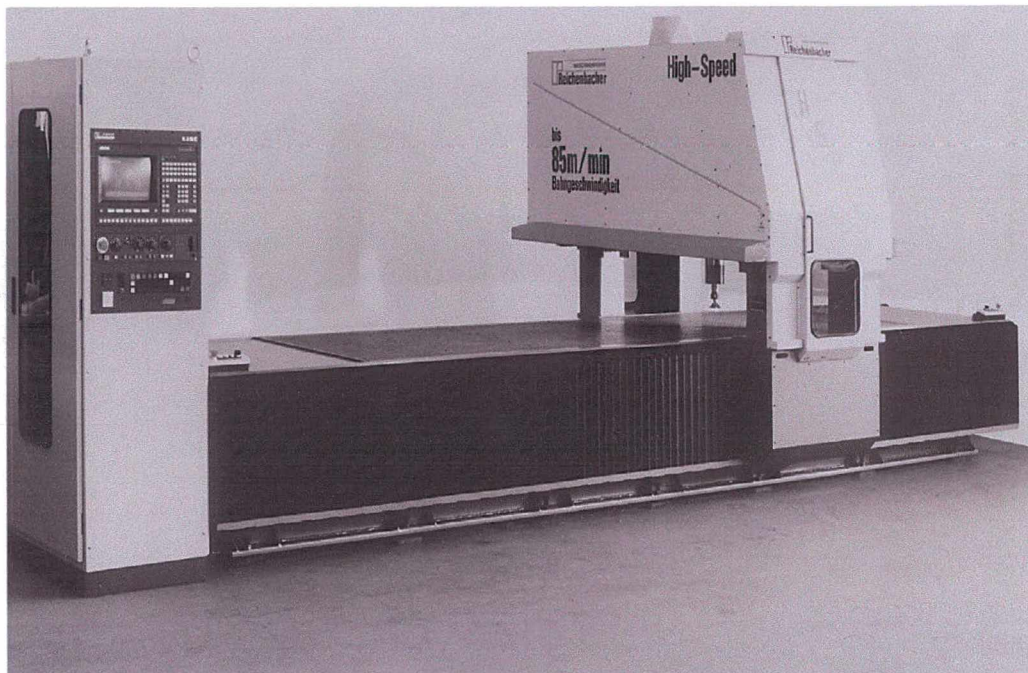


Figura 15 – Fresadora CNC de topo Reichenbacher modelo Ranc 740 H .

4.2. FERRAMENTA

Como ferramenta foi utilizada uma fresa com dois insertos, (Fa. Leuco), apropriadas para o fresamento de ranhuras em madeira maciça em fresadoras CNC (**Figura 16**).

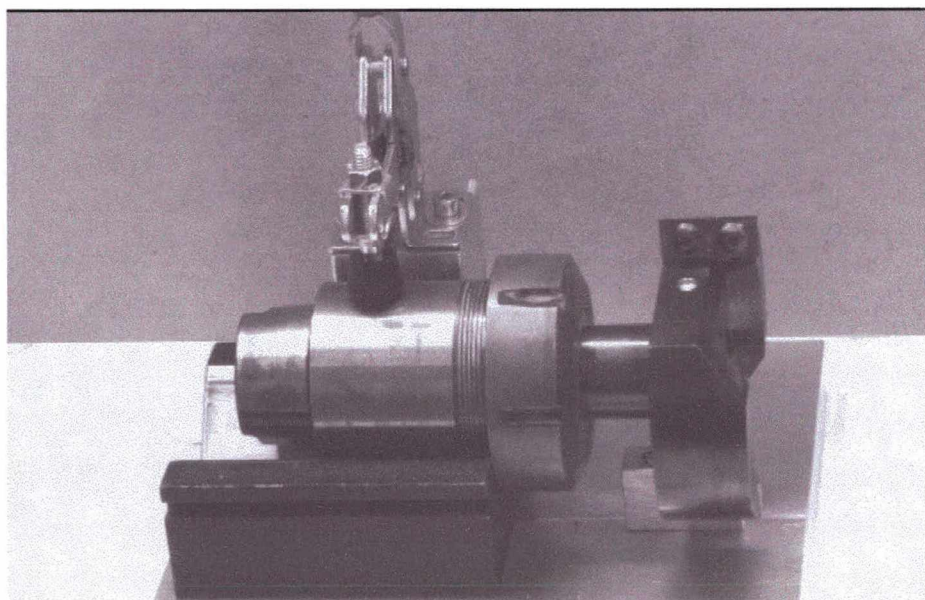


Figura 16 – Fresa de topo para fresamento em altas velocidades [Fa. Leuco].

A ferramenta tem um diâmetro de 80 mm projetado para uma rotação máxima de $n_{\max} = 18.000$ 1/min ($v_{\max} = 75$ m/s). A ferramenta selecionada foi de metal duro (HM HL Board 05 da Fa. Leuco) – material de ferramenta internacionalmente utilizado pelo segmento moveleiro.

Para minimizar o efeito do erro de posicionamento rotativo entre as pastilhas sobre o resultado de usinagem e garantir um perfeito balanceamento da ferramenta para elevadas rotações de trabalho, um dos gumes foi levemente recuado, de forma que não tivesse mais participação no processo de corte.

Com o emprego de ferramentas de um só fabricante evitam-se em parte os problemas de dispersão dos resultados de ensaios devido as variações de qualidade das ferramentas entre diferentes fabricantes, já que os resultados de trabalho na usinagem são fortemente influenciados por variações na qualidade do gume. Antes de cada bateria de ensaios analisaram-se as ferramentas com auxílio de microscopia óptica, na busca de sinais de desgaste que pudessem trazer influências negativas à análise dos resultados. A não ser em casos específicos onde se procurou verificar a influência do desgaste sobre o resultado de trabalho, as ferramentas utilizadas nos ensaios deste trabalho foram novas. Alterações visíveis por microscopia óptica no estado do gume implicaram em substituição da ferramenta utilizada nos ensaios por outra com mesmas características geométricas, porém nova.

4.3. CORPOS DE PROVA

As amostras de madeira foram coletadas no Brasil em plantios clonais comerciais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* com vinte e três e dez anos de idade, respectivamente, na região de Colombo - PR, em propriedade da EMBRAPA Florestas e na região de Telêmaco Borba - PR da Empresa Florestal KLABIN. As amostras de *Fagus Sylvática* (Rotbuche - faia rubra) foram adquiridas no mercado de madeiras em Braunschweig, na República Federativa da Alemanha.

Foram somente empregadas as tábuas centrais de cada espécie para os estudos de usinagem com ênfase para a análise do acabamento superficial.

Para evitar variações na influência do trabalho de pré-usinagem sobre os resultados finais, os corpos de prova foram todos preparados através do mesmo procedimento. Para isto todos os corpos de prova foram pré-usinados com parâmetros de usinagem idênticos, escolhidos de forma a evitar ao máximo danos na camada-limite do material. Como medida preventiva para reconhecer um possível desgaste da ferramenta de corte, a superfície gerada na pré-usinagem foi

analisada em intervalos periódicos, na busca de possíveis alterações na sua qualidade. Também para os ensaios de força foram realizados ensaios periódicos com condições padronizadas.

Os corpos de prova foram sistematicamente preparados para o fresamento no plano longitudinal tangencial com dimensões de 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 30 mm de espessura para os três tipos de madeira ensaiados. Foram também observados, que os corpos de prova tivessem umidade constante e que todos originassem do mesmo „pedaço“ de madeira observando o sentido de crescimento da árvore. Para poder verificar o resultado de trabalho através da medição dos parâmetros de rugosidade foram fresados uma ranhura de 10 x 10 mm², com isso obteve-se uma área suficiente para possibilitar um comprimento de medição de 7 mm na direção X do sistema de medição de rugosidade.

4.4. SISTEMAS DE MEDIÇÃO

A grandeza de influência sistematicamente analisada foi o avanço por dente por rotação (f_z) tanto para a análise do acabamento superficial quanto das forças na usinagem das madeiras clonadas de *Eucalipto grandis* e *Eucalyptus dunnii*, bem como de *Fagus sylvática* (Rotbuche). Foram ainda realizados ensaios da vida útil da ferramenta para as diferentes espécies de madeira em estudo.

Na análise de forças de usinagem foi empregado o processo de fresamento conjugado de topo e periférico.

4.4.1. MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE USINAGEM

A montagem da cadeia de medição para o fresamento de madeiras em altas velocidades implica na análise e solução de problemas não triviais. A dificuldade para a execução desta tarefa encontra-se principalmente no fato de que se por um lado é necessária uma grande sensibilidade no sistema para perceber níveis de força pequenos, o que significa ter um sistema de rigidez não muito elevada, por outro lado uma rigidez insuficiente do sistema de medição pode levar a ocorrência de vibrações, que podem resultar em erros nos resultados. Ao mesmo tempo que se deseja uma elevada sensibilidade em um sistema de medição de força, deseja-se portanto uma rigidez suficiente, o que leva à necessidade de assumir um compromisso entre estas duas características opostas. No caso da usinagem de madeiras em altas velocidades, a medição de forças de usinagem é crítica, visto apresentarem forças de corte e de avanço em níveis inferiores às que surgem na usinagem de materiais metálicos e a dinâmica do sinal de força

gerada é mais alta, associados aos problemas relacionados a ruídos de sinal, que são maiores. Além disso, a análise dos sinais de força de usinagem no corte interrompido são mais complexas porque os sinais são interrompidos também.

Alguns trabalhos no campo de medição de forças de usinagem de diferentes espécies de madeira foram realizados nos últimos anos no IWF-Braunschweig. Os sensores piezelétricos mostraram-se bastante adequados, visto terem alta sensibilidade e frequência própria também relativamente alta. Além disto, sistemas de medição que utilizam sensores piezelétricos caracterizam-se por grande linearidade e praticamente a ausência de histerese, são de manuseio relativamente simples e têm grande durabilidade.

Neste caso, para a medição das forças de usinagem as peças foram fixadas diretamente sobre a plataforma piezelétrica. Na mesa da fresadora foi fixada por vácuo uma plataforma da firma Kistler de três eixos do tipo 9257 A, permitindo a medição simultânea das três componentes da força de usinagem. A faixa de medição é de ± 5 kN para cada componente da força (F_{fn} , F_f). Este sistema que tinha frequências naturais na direção x e y (força de avanço F_f e força normal de avanço F_{fn} , respectivamente) acima de 2 kHz e na direção z (força passiva) acima de 4 kHz.

As componentes das forças de usinagem puderam ser medidas no sistema de referência ao lado da peça nas três componentes ortogonais: força de avanço, força normal de avanço e força passiva. Em consequência do comportamento de ataque simétrico e na ausência do ângulo de inclinação do gume principal a força passiva foi nula. Eventuais picos da força passiva medidos são consequentes da influência da heterogeneidade do material. Por outro lado, a força normal de corte varia segundo o ângulo de ataque atual em diferentes partes que estão subdivididas em força de avanço e força normal de avanço, que podem ser novamente adicionadas vetorialmente compondo a força ativa. A força ativa atinge o máximo valor para um ângulo de ataque de $\varphi \cong 41,4^\circ$.

Para a medição de forças com um dinamômetro piezelétrico, as pequenas cargas elétricas surgidas nos cristais piezelétricos pela aplicação de forças são transformadas em uma tensão proporcional à carga em um amplificador. Esta tensão é digitalizada por um sistema de aquisição e tratamento de sinais, o que permite seu posterior tratamento e análise com um software adequado a um micro computador (**Figura 17**).

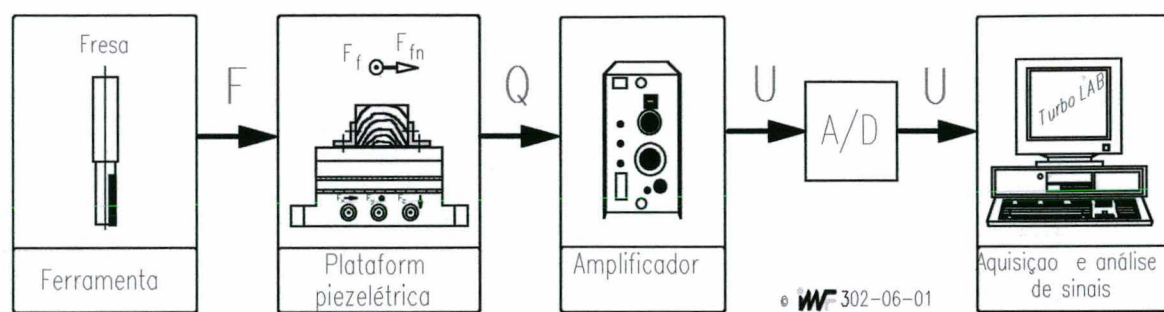


Figura 17 – Configuração do sistema para medição de forças no fresamento em altas velocidade de madeiras.

Os amplificadores devem possuir uma alta resistência interna, na ordem de $10^{14} \Omega$, de maneira que as perdas de carga dos sensores piezelétricos são relativamente lentas e de acordo com uma função exponencial. Estes amplificadores transformam a carga elétrica dos sensores piezelétricos em um sinal analógico de tensão no âmbito de $\pm 10 \text{ V}$, sendo a sensibilidade, o campo de medição e, com isto, a resolução dos mesmos pode ser modificada. O emprego de filtros foi necessário, o que permitiu a regulação dos amplificadores para cada diferente tipo de aplicação.

O sistema empregado para aquisição e análise dos sinais é composto de uma placa de aquisição de sinais, um microcomputador e um *software* para análise e cálculo dos resultados. Este sistema como um todo permite uma frequência de aquisição de dados acima de 2 kHz, em sua configuração básica.

Com o *software* é possível, além do armazenamento dos sinais de força em forma digital e ordenada, uma análise dos resultados e ajustes de curvas geradas, bem como a apresentação sob diversas formas.

A reprodutibilidade de um sistema de medição, assim como o conhecimento de seus comportamento estático e dinâmico durante o processo de medição, então entre as exigências mínimas que se deve fazer a um sistema deste tipo. Para chegar a estes conhecimentos é necessário realizar uma calibração do sistema sob diferentes condições e analisar os resultados obtidos, entre outras medidas.

A calibração da plataforma piezelétrica foi realizada para as direções X e Y, respectivamente as direções de F_f e F_{fn} , durante um processo de fresamento conjugado. Para isto cada uma das direções foi carregada estaticamente com massas padronizadas de forma a verificar o comportamento do sistema de medição e a influência de uma direção sobre a outra, tanto para o carregamento independente de cada direção como para o carregamento simultâneo. O

carregamento de uma direção apenas ocorre através da aplicação vertical de carga sobre o canal que se quer medir, enquanto que o carregamento simultâneo de duas direções a aplicação de carga se dá sob um ângulo entre 0 e 90° com relação às direções medidas.

A sensibilidade do sistema de medição pode ser verificada experimentalmente através de testes com variação contínua do avanço ou da profundidade de corte com uma análise posterior do sinal de força gerado e verificação dos limites onde ainda é possível perceber claramente a variação do sinal. Teoricamente sensores piezelétricos permitem a verificação de variações de sinal infinitamente pequenos, entretanto a existência de ruídos durante o processo de medição dificulta a verificação das forças abaixo de um determinado limite.

A análise dos sinais de força é dificultada pela existência de sinais de ruído durante o processo de usinagem. Como ruído são denominados os desvios dos valores de um certo valor médio, causados por processos elementares independentes como, por exemplo por elementos do sistema de medição e pelo próprio processo de usinagem, que podem dificultar ou até impossibilitar a análise dos resultados obtidos. A tensão de saída de um sensor piezelétrico contém um certo nível de ruído, causado por cada conexão e elemento eletrônico que contribuem para que o sinal de saída tenha perturbações.

Durante o procedimento de medição de forças no fresamento de madeiras em altas velocidades, o emprego de filtros “passa-baixo” mostra-se útil para uma verificação de sinais de força muito pequenos durante o processo de usinagem. Através do emprego de filtros é possível verificar o nível estático das componentes de forças, sem que os resultados sejam alterados por este procedimento. Entretanto, para que isto ocorra, faz-se necessária a adoção de limites de filtragem, que devem ser ajustados à dinâmica do processo e às características da plataforma piezelétrica (frequência própria, por exemplo). Uma análise dos sinais obtidos para o emprego de diversos procedimentos de filtragem mostra que até um certo limite de frequência os resultados das médias de forças não são afetados pela filtragem, embora as curvas mostrem um comportamento cada vez mais suave (com uma menor dinâmica) para o emprego de filtros de menor frequência. Abaixo deste limite de frequência, que é diferente para os diversos procedimentos de medição e condições de ensaio, é possível perceber, eventualmente uma queda gradual na média das forças medidas, o que torna aconselhável a análise deste valor de frequência para o uso de filtros “passa-baixo”.

Antes da realização dos ensaios foi verificada a função transferência entre a excitação impulsiva e a resposta da cadeia de medição para as forças de usinagem em cada caso, com o

objetivo de determinar o filtro ideal para a medição. Foram testados diferentes filtros digitais do tipo “passa-baixo” para se extrair sinais perturbadores e consequentemente alcançar a filtragem adequada do sinal.

O tratamento dos sinais de força com o uso de filtros “passa-baixo” já durante o processo de medição das forças não é sempre necessário, visto que uma “suavização” das curvas pode ser feito através do *software* empregado. Esta “suavização”, entretanto, somente pode ser utilizada caso a frequência de aquisição dos sinais de força tenha sido alta. Como frequências de aquisição muito altas implicam em uma quantidade de dados muito grandes, também a filtragem já durante a medição ou com o uso de *software* após a medição deve ser estabelecido um compromisso.

Segundo o critério de *Nyquist*, a frequência de aquisição de sinais deve ser pelo menos o dobro da frequência a ser medida. Neste trabalho, com a rotação mais elevada da ferramenta e com isto velocidades mais elevadas teve que ser aumentada a frequência de aquisição, para que sempre menores períodos de ataque do gume da ferramenta ocorresse sem erros.

Para separar os sinais de força dos sinais de ruído, sempre presentes durante o processo de medição, da dinâmica da formação de cavacos, é possível ainda fazer uso de uma “suavização” integrativa, de maneira que diversos dados individuais subsequentes são empregados para calcular uma média de valores, sendo os mesmos substituídos por esta média. Quanto mais pontos forem empregados para calcular uma média, mais suaves serão as curvas obtidas.

O processo de formação de cavacos durante a usinagem é, normalmente, um fenômeno de alta dinâmica, sendo que esta dinâmica se reflete sobre os sinais de força. A heterogeneidade do material usinado, as diferentes propriedades mecânicas dos mesmos, os parâmetros de usinagem e as características das ferramentas estão entre os fatores que fazem com que os sinais de força durante a usinagem tenham variações significativas e de alta frequência.

Com o emprego do sistema de medição de referência lateral a peça foi possível somente no fresamento conjugado de topo e periférico em alta velocidade medir a força média de avanço F_f e a força média normal de avanço F_{fn} . Desta forma, as forças máximas de usinagem foram calculadas segundo Kivimaa [1952], Jostmeier [1966] e Sandvoß [1971].

4.4.2. INVESTIGAÇÃO DA CURVA DE VIDA DA FERRAMENTA

Durante a usinagem, a cunha é submetida a um desgaste que depende da forma de solicitação e da duração de utilização da ferramenta. As formas de desgaste mais freqüentes na ferramenta no processo de fresamento é o deslocamento do gume em relação a face $SV\gamma$, que é empregado como critério de fim de vida. Neste trabalho, serão considerados este critério e o do acabamento superficial, por ser de maior interesse para o setor industrial de transformação de madeiras.

Para a medição do deslocamento do gume em relação a face $SV\gamma$ das ferramentas de metal duro foi utilizado um rugosímetro de bancada da marca PERTHEN, modelo S8P equipado com uma unidade de processamento de dados, uma unidade de deslocamento linear, um apalpador mecânico com geometria distinta, e dispositivo de posicionamento e fixação da ferramenta (**Figura 18**).

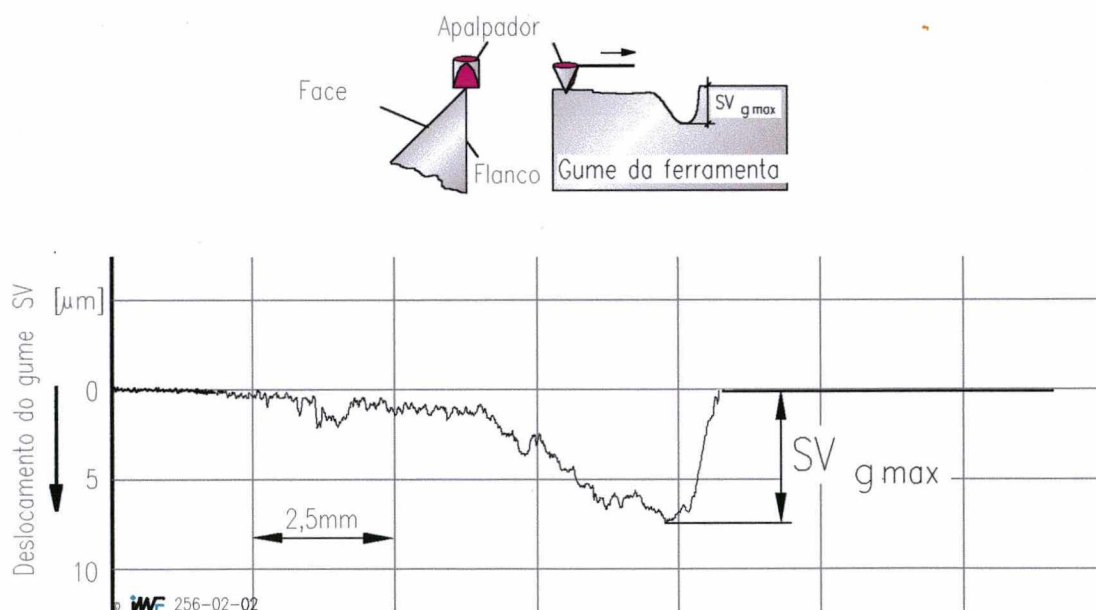


Figura 18 – Medição do desgaste da ferramenta (deslocamento do gume em relação a face $SV\gamma$) por meio de uma sonda com apalpador mecânico.

Além do equipamento de medição, tinha-se disponível um conjunto de padrões de calibração, devidamente aferidos e rastreáveis e um microscópio óptico para análise de desgaste da ponta do apalpador mecânico. Se optou pela apalpador mecânico do tipo FRHTB 750, que possui um sensor com um raio de ponta de 10 μm indicado para a medição de desgaste de ferramentas. A força de medição deve ser tal que garanta o contato contínuo entre o apalpador e a superfície, sem que no entanto ocorra qualquer dano a ela. O valor admissível para a força de

medição depende ainda do raio da ponta do apalpador, nesse caso variando de 5,0 a 7,0 mN. A faixa de máxima de medição é de 750 μm . Foi escolhido um comprimento de medição de $l_t = 17,5 \text{ mm}$.

A agulha do apalpador desliza constantemente sobre a superfície do gume da ferramenta. A agulha se eleva e desce em dependência do perfil da superfície (**Figura 18**). O curso da agulha é ampliado em relação a um ponto de referência de maneira elétrica e indicado na forma de um registrador de perfil. Os perfis lidos são interpretados no final da medição. Esse método de medição de desgaste é só possível para ferramentas com gume reto.

Ainda, foram determinados para alguns ensaios a medição do arredondamento do gume, ou seja, a forma da extremidade do gume. Westkämper [1990] descreveu o procedimento, que emprega massa plástica (Silicone de moldagem de duas componentes Reprosil HF) para obter a marca negativo do gume da ferramenta. Estes foram divididos depois em finas camadas em forma de disco com o aparelho "MICROTOM". Por fotos com o auxílio do microscópio poderiam ser determinados a forma do gume, aumentando subsequente o detalhe da marca negativa do gume desgastado.

Com a avaliação das cortes transversais das marcas negativa do gume na massa, foi medido a largura da marca do desgaste tanto no gume principal como no secundário, como mostrado exemplarmente na **Figura 19**.

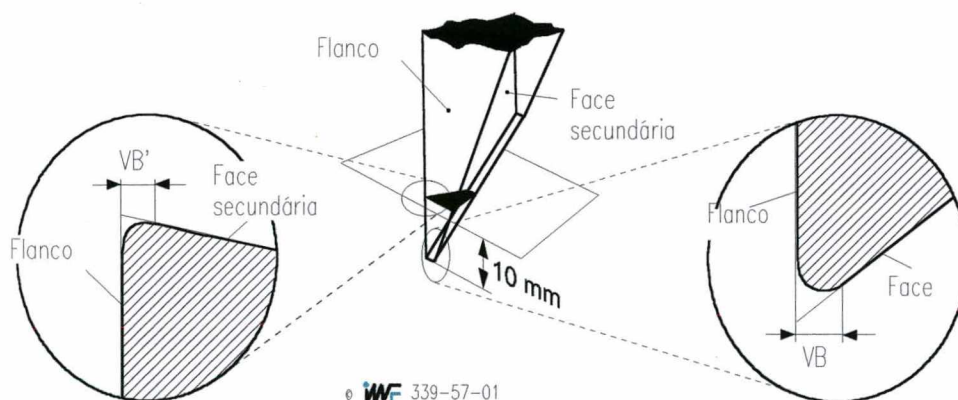


Figura 19 – Determinação da marca de desgaste e da largura da marca de desgaste VB para a ferramenta de metal duro por meio de um processo de impressão da gume da ferramenta.

4.4.3. AVALIAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL

Para a medição da textura das superfícies dos Corpos de Prova foi utilizado também um rugosímetro de bancada da marca PERTHEN, modelo S8P (**Figura 20**), equipado com uma unidade de processamento de dados, uma unidade de deslocamento linear, uma sonda mecânica com geometria distinta, e dispositivo de posicionamento e fixação das peças. Além do equipamento de medição, tinha-se disponível um conjunto de padrões de calibração, devidamente aferidos e rastreáveis e um dispositivo específico para análise de desgaste da ponta do sensor mecânico. Dentre as sondas mecânicas disponíveis se optou pela FRHTB 250, que possui um sensor com um raio de ponta de $5\text{ }\mu\text{m}$ indicado para a medição de rugosidade em madeira maciça. O valor admissível para a força de medição depende do raio da ponta do apalpador variou de 0,8 a 1,2 mN. A faixa de máxima de medição é de $500\text{ }\mu\text{m}$. Foi escolhido um comprimento no sentido x de $l_x = 7,0\text{ mm}$ e no sentido y $l_y = 10,0\text{ mm}$ (**Figura 20**).

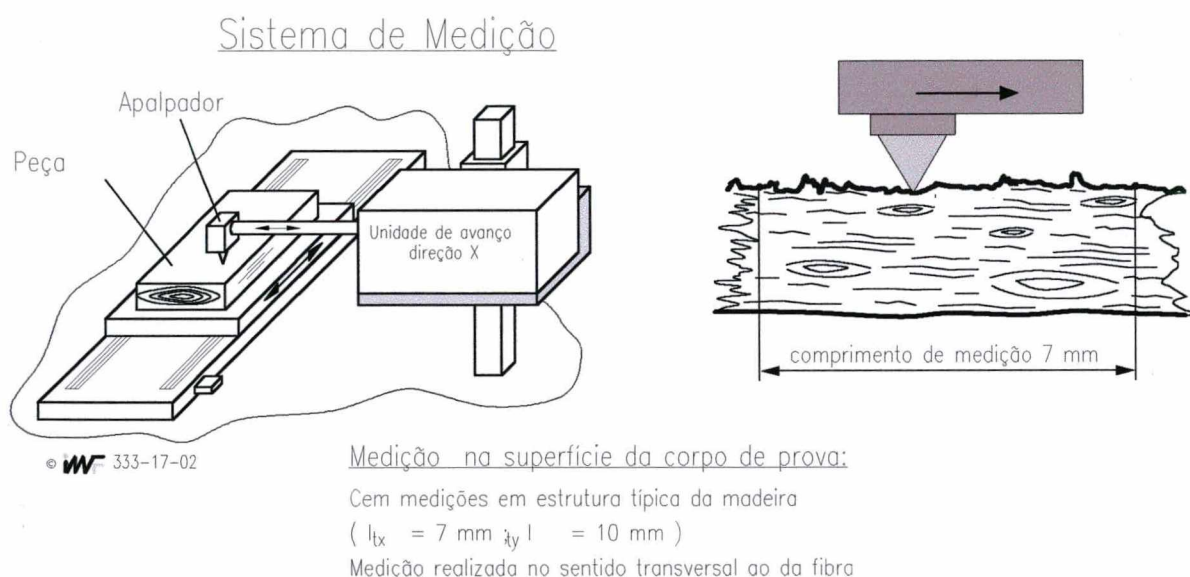


Figura 20 – Medição da textura superficial por meio de uma sonda com apalpador mecânico.

Neste rugosímetro de bancada a superfície de referência está alojada dentro da unidade de avanço e as sondas não necessitam de patins auxiliares para a medição da textura da superfície. O procedimento de calibração é simples e confiável.

A dimensão mínima do raio de ponta e sua geometria ainda não são suficientemente pequenas para permitir a exploração do fundo das micro-cavidades, limitando a capacidade de apalpamento da superfície. Esta limitação atua como um filtro indesejado, mas somente para as cavidades, uma vez que os picos são na sua maioria relativamente bem detectados e

caracterizados. Assim, é introduzida uma fonte de erros sistemáticos na determinação de alguns parâmetros de rugosidade. No atual estado da técnica esta influência pode ser minimizada pelo método de “filtro de poros” desenvolvido pelo IWF-Braunschweig [SCHADOFFSKY, 1997].

A pré-condição para a avaliação da rugosidade produzida em processos de usinagem é a aquisição de dados da superfície por meio de uma técnica de medição qualificada. Para isso um modelo 3-D da geometria da superfície é gerada ajustando imagens de perfis 2-D paralelos lado a lado. A **Figura 20** mostra esquematicamente os instrumentos de medição utilizados.

As superfícies planas anisotrópicas onde se deseja dados relacionados especificamente com os desvios de Quarta ordem (rugosidade do processo) é necessário se medir a textura da superfície na mesma direção das raia de usinagem. Para a interpretação dos resultados devem ser também observados a estrutura anatômica da madeira, pois os parâmetros nominais de rugosidade devem ser medidos sobre amostras de corpos de provas secos e transversal ao sentido da fibra, que, neste caso, coincide com a direção das raia de usinagem.

A peça é fixada sobre uma mesa que se movimenta no sentido Y. Cada perfil é medido em X. A operação de medição é controlada por um computador, no qual é também usado para o processamento de dados de medição.

Neste trabalho foram processados 6 tipos de parâmetros segundo a norma DIN 4768 para três diferentes espécies para diferentes condições de usinagem, tanto para os pré-testes como para a investigação das características de usinabilidade. Os seguintes parâmetros foram observados:

De acordo com as grandezas nominais segundo a DIN 4768 foram determinados em ensaios preliminares e de vida as grandezas de rugosidade da Curva de Abbot. As seguintes grandezas nominais foram analisadas:

- | | |
|--|-----------|
| • Valor médio de Rugosidade | R_a |
| • Profundidade média de Rugosidade | R_z |
| • Profundidade máxima individual de Rugosidade | R_{max} |
| • Altura reduzida dos picos | R_{pk} |
| • Profundidade da rugosidade central | R_k |
| • Profundidade reduzida de vales | R_{vk} |

Para a análise quantitativa do parâmetro rugosidade foi aplicado o processo de filtragem denominado de „filtro de poros“ desenvolvido no IWF-Braunschweig. Este processo de filtragem é semelhante a opção de filtragem especial segundo a Norma DIN 4776 construído em vários níveis e permite o cálculo de novos parâmetros importantes na tecnologia de usinagem de madeiras através de novas rotinas matemáticas. A rugosidade estrutural e a rugosidade originada pelo processo de fabricação são separados um do outro pelo perfil de medição.

Ainda foram selecionados e utilizados no processamento dos dados por esse “filtro de poros” um filtro de linha média gaussiano e um filtro especial SF (DIN 4776/90) que é mais adequado para superfícies de materiais com poros. Os filtros especiais separam do perfil primário as porções mais profundas dos vales antes de efetuar a filtragem e depois as recolocam no perfil já filtrado. Com isto se consegue eliminar qualquer tipo significativo de distorção de fase.

A seleção do cut-off λ_c foi realizada segundo a norma DIN 4768/90. Os corpos de provas se adequaram a um λ_c igual a 0,8mm.

A medição dos parâmetros de rugosidade foram realizados para corpos de prova originados do mesmo pedaço de madeira maciça.

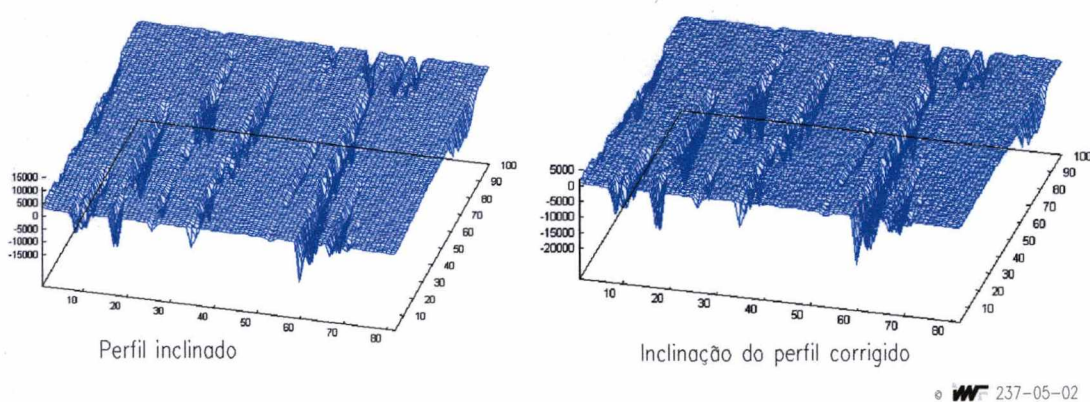
Para garantir a segurança na reprodução dos resultados foram fabricados os corpos de prova de madeira de forma sistemática e uniforme. Através do alinhamento da peça sobre a plataforma de medição piezelétrica segundo o sentido de corte longitudinal e numa rígida sequência de cortes adjacente dentro da mesma tábua puderam ser eliminadas as influências das condições de crescimento sobre o resultado de trabalho.

O resultado de medição é obtido a partir da medição de 100 perfis de rugosidade em cada uma dessas superfícies geradas.

A enorme quantidade de dados da geometria obtidos pelo sistema de medição 3D (aproximadamente 8.000 valores por perfil) requer um sinal condicionado em ordem, para permitir uma evolução efetiva do meio de imagens processadas. A **Figura 21** mostra um perfil 3-D da superfície medida.

Geralmente, a superfície da peça de trabalho é inclinada na direção de avanço no sistema de medição. Antes de tudo, a inclinação do perfil medido é corrigido por meio do método da distância dos mínimos quadrados (**Figura 21**, direita).

A diferença entre o menor e o maior valor é reduzido consideravelmente. Após isso, os dados são colocados em um sistema para a análise. Para isto é preciso reduzir os dados medidos e seus desvios. De um lado, o algoritmo do analisador de imagem corresponde somente 256 valores na escala binária, o que significa que a topografia da superfície pode somente ser representada em 256 valores naquela escala. Uma simples imagem do perfil contudo, compreende mais de 8.000 valores, o qual requerem filtros ou que o número de valores seja reduzido. Em vez de reduzir o número de imagens de perfis individuais e de se conseguir corretamente produzir escalas na altura dos perfis, uma interpolação linear tem que ser feita entre as imagens individuais do perfil. Desta maneira, são feitas as figuras. A **Figura 21A** mostra a parte medida das superfícies.



Método da distância dos mínimos quadrados:

A superfície plana de regressão $l(x, y) = ax + by + c$ é calculada,

para que o erro
$$g(a, b, c) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [z_{ij} - l(x_i, y_j)]^2$$
 seja minimizado.

Figura 21 – Correção 3D dos valores de rugosidade medidos.

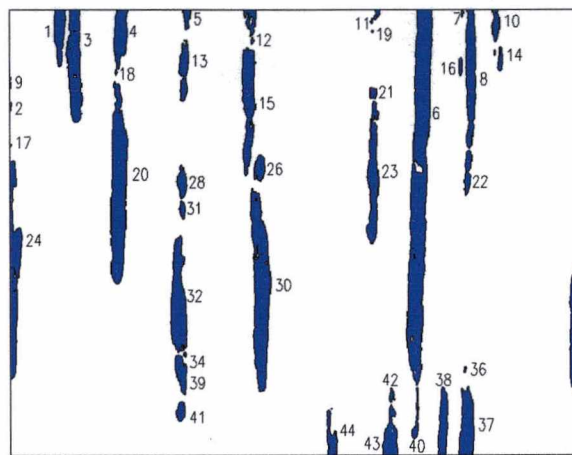
O próximo passo é identificar as marcas específicas na madeira em sua superfície e ser capaz de se considerar a rugosidade produzida na usinagem separadamente da rugosidade específica da madeira. Para isto é feita primeiramente uma filtragem, que é um método comum na análise de imagens para completar a correção do segundo plano. Neste caso, desvios na forma e na ondulação são reduzidos. Para se fazer melhor uso da variação de valores dos dados da geometria, repetir o módulo da filtragem por filtro Gaussiano 2-D, o qual é ativado após a determinação dos declives.

O próximo passo inclui a segmentação de diferentes características. Aqui a análise de distribuição da escala binária e a subsequente segmentação trouxe a definição de valores críticos. Esse método tem se tornado problemático, quando se considera o processo automático para a

delimitação exata dos objetos, bem como o perfil da superfície. Particularmente, superfícies que contém rugosidade conseqüentes do processo de usinagem requerem um método mais complexo. Uma parte essencial de muitos métodos são os gradientes que ocorrem no perfil da superfície. As áreas são então identificadas como um objeto simples por meio de algoritmos para o esboço do perfil. A **Figura 22B** mostra o resultado do procedimento. A característica específica da madeira mostra na **Figura 22A** onde foram identificados como objeto.



a) Perfil de uma superfície transformada dentro de uma figura de escala cinza.



b) Característica estrutural identificada originada da anatomia da madeira (Poros)

Figura 22 – Identificação das características superficiais da madeira por meio da análise da imagem .

Cada objeto é experimentado e medido individualmente e feito uma estatística adicional detalhada. Ele é testado, como os objetos ficam com característica da madeira ou marcas feitas pelo processo de usinagem. Além disso, muitos dos procedimentos parecem ser desnecessários considerando, por exemplo, com a rugosidade de fabricação e/ou pequenos poros, a diferenciação entre as características específicas da madeira, e os problemas devido a usinagem podem freqüentemente ser feitos somente depois de uma análise. Marcas de polimento, por exemplo, podem ser confundidas com poros. Eles discordam, contudo, no comprimento, largura, freqüência ou na direção de corte. Todos os objetos segmentados mostrados na **Figura 22B** estão identificados, o qual podem ser conseguidos por comparação da baixa rugosidade produzida na usinagem. Neste trabalho, foi utilizado uma fresa de gume único com o objetivo de facilitar esta análise.

Desde a posição e as dimensões das características específicas da madeira, na escala binária as imagens são conhecidas, eles podem ser desconhecidos na medição original. Como conseqüência, os algoritmos dos valores característicos evoluem somente naquelas áreas da superfície originadas no processo de usinagem e a rugosidade produzida na usinagem.

A **Figura 23** mostra duas imagens de perfil, o qual correspondem a linha plotada na **Figura 22B**. Enquanto a **Figura 23A** mostra a medição do perfil, onde a rugosidade específica da madeira e a rugosidade produzida em recobrimentos; o perfil mostrado na **Figura 23B** somente contém a medição na qual foram designadas para a rugosidade produzida na usinagem. Os valores característicos filtrados são designados ou por um apóstrofo (R'_z , R'_k , R'_{pk} , R'_{vk}) ou descritos como valores originais e valores filtrados 3D e podem ser usados para exprimir numericamente a rugosidade produzida na usinagem.

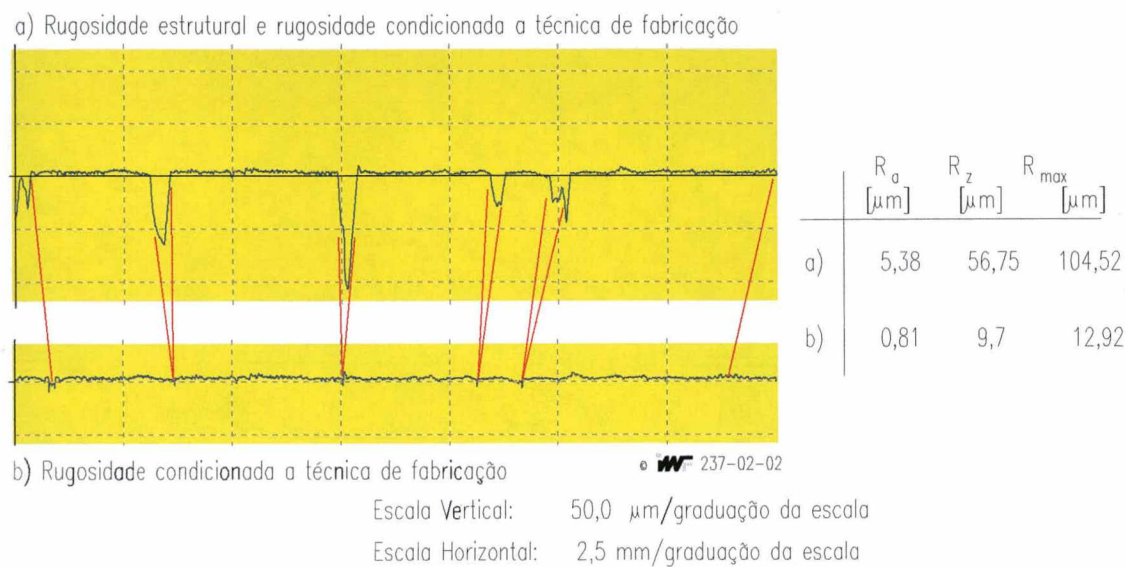


Figura 23 – Perfil de rugosidade de madeira maciça.

A utilização deste programa computacional denominado de “filtro de poros” desenvolvido no IWF-Braunschweig é o primeiro passo para se poder desenvolver uma análise quantitativa da textura de superfícies de madeira maciça. Um dos objetivos deste trabalho foi mostrar a viabilidade e os meios para se empregar este tipo de programa, seja para aplicação científica, seja para aplicação tecnológica.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As forças de usinagem e o desgaste do gume da ferramenta podem ser relacionadas à qualidade superficial obtida, principalmente, em operações de acabamento. A relação entre estes fatores já foi analisada por diversos pesquisadores da área de usinagem de madeiras maciças, principalmente na usinagem de madeiras de floresta nativa da zona temperada como, por exemplo, para “Fichte (Abeto – pinheiro)” e “Rotbuche (*Fagus gustfólia*: faia rubra)”. Entretanto, para a usinagem com ferramentas de metal duro das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* abordados neste trabalho, são encontrados poucos resultados de pesquisa sobre este tema. A dificuldade para a medição de forças em níveis como os que ocorrem na usinagem destes materiais, aliada a uma importância secundária que tais madeiras desempenharam no campo de fabricação moveleira nos últimos anos, em comparação com as madeiras de floresta nativa, podem ser considerados entre os principais motivos para que este assunto não tenha tido um maior destaque.

5.1. INFLUÊNCIAS SOBRE AS FORÇAS DE USINAGEM

A verificação da influência das condições de usinagem sobre a força de corte tem sido objeto de estudo em alguns trabalhos publicados por pesquisadores especialistas na área de usinagem de madeira e de seus derivados.

O desempenho de corte pode ser representado pela força de corte, relacionado a maior ou menor dificuldade de realizar o trabalho de corte da madeira, de forma a estabelecermos critérios de produção com vistas a produtividade e qualidade.

A determinação da pressão específica de corte é de grande importância, pois possibilita o cálculo dos esforços de corte e da potência de corte necessária em processos de usinagem da madeira para uma determinada taxa de remoção de cavaco. Isto significa que quando se conhece os valores da pressão específica de corte dada pela equação de Kienzle, pode-se otimizar o processo de usinagem da madeira com a utilização do máximo rendimento que a máquina-ferramenta pode oferecer, ou ainda, pode-se projetar máquinas-ferramentas que ofereçam com segurança a potência exigida pela operação a que se destinam. Para tanto, torna-se necessário quantificar as grandezas relativas ao processo através de dados experimentais.

A equação geral de Kienzle pode ser escrita na seguinte forma, conforme descrito no capítulo 2:

$$F'_c = k_{c1,1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad \text{com } F'_c = \frac{F_c}{b} \quad (20)$$

O expoente adimensional “1-m_c” e a constante do material K_{c1,1} são os parâmetros característicos referentes ao material da peça, ao processo de usinagem, ou seja, condições de usinagem e geometria da ferramenta.

No presente trabalho, representam as características e propriedades da madeira, como o teor de umidade e a densidade para a direção de corte paralela às fibras.

Para determinar a força específica foram necessárias ensaios e análises preliminares sobre a influência do teor de umidade e do avanço (espessura de usinagem) sobre as forças de usinagem.

5.1.1. INFLUÊNCIA DA UMIDADE

Para a análise da influência do teor de umidade sobre as forças de usinagem foram realizados ensaios com corpos de prova da espécie *Eucalyptus dunnii*. Com o objetivo de minimizar a influência da heterogeneidade do material em análise, foi utilizada preferencialmente uma única tábua com corpos de provas cortados no sentido tangencial longitudinal. Alguns corpos de prova tiveram que ser secados artificialmente em estufa para obter a faixa necessária para a comparação com resultados importantes de pesquisas anteriores para outras espécies, entre 7 e 55% de teor de umidade.

Para determinar a “umidade” dos corpos de prova de madeira foi empregado um medidor elétrico padronizado, que media a resistência elétrica entre duas pontas cravadas na madeira, fornecendo diretamente, como leitura, o teor de umidade do corpo de prova.

No gráfico mostrado a seguir, os pontos marcados representam a média de vinte medições do teor de umidade em diferentes pontos do corpo de prova, sendo também indicado no gráfico o desvio padrão de cada ponto. Como em todos os pontos medidos o desvio padrão mantém-se na ordem de grandeza da repetibilidade teórica do sistema de medição, e como foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos, assegura-se a confiabilidade dos resultados obtidos.

A influência do teor de umidade da madeira na faixa de umidade “seca ao ar” ou “artificialmente” ou ainda na faixa de “muito úmida” é comparativamente muito pequena. Se verifica para os corpos de prova da madeira de *Eucalyptus dunnii* na faixa de umidade até aproximadamente 21%, e na faixa de 40% a 55% de teor de umidade nenhuma influência sobre a força de corte. Um máximo da força, relativamente muito fraco, para um teor de umidade de 30% foi determinado (Figura 24).

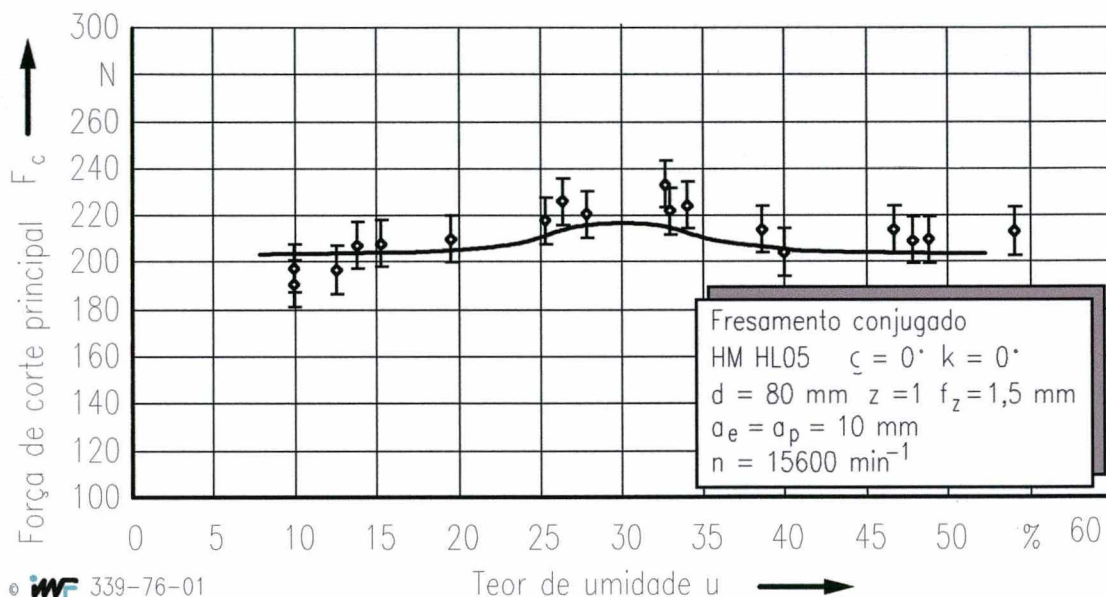


Figura 24 – Influência da umidade sobre a força de corte máxima para a espécie *E. dunnii*.

5.1.2. INFLUÊNCIA DO AVANÇO

Para a análise da influência das diferentes grandezas sobre as componentes da força de usinagem foram medidas as componentes da força por sistema de medição piezelétrico.

Para a comparação dos resultados com outras pesquisas realizadas e para simplificar o cálculo das forças para outras profundidades da peça foi escolhida uma largura de corte de $a_e = 10$ mm. Para a generalização dos resultados pode então ser calculada as forças de corte específicas unitárias dada por $F'_c = F_{cmax} / a_e$.

Com a finalidade de reduzir significativamente o número de ensaios, foram variados os avanços para uma rotação constante máxima permitida pelo fabricante da máquina ferramenta, que era de $n = 15600$ min⁻¹ e que contemplava um dos objetivos do trabalho, o fresamento em altas velocidade de corte. Essa rotação foi selecionada também, pois em combinação com o

diâmetro da ferramenta, se poderia realizar importantes análises para ensaios na faixa de avanço de até $f_z = 2,0$ mm.

A elevação da força de avanço com o aumento do avanço foi investigada para o fresamento conjugado de topo e periférico de três diferentes espécies *Fagus sylvatica* (Rotbuche), *E. grandis* e *E. dunnii*. Para poder reconhecer melhor a influência da heterogeneidade dos corpos de prova (faixa de dispersão dos valores medidos) sobre a medição das forças, foram analisadas estatisticamente no desenvolvimento do processo a média de doze pontos de medição para cada ponto no gráfico e para cada caso investigado.

Pesquisas realizadas na usinagem convencional de materiais metálicos mostram que incrementos no avanço levam a um aumento não linear tanto da força de corte como da força de avanço [Könnig, 1990].

Segundo Stühmeier [1989], Sandvoß [1971] e Weber [1962], este comportamento não é verificado na mesma proporção para a usinagem de derivados de madeira, e também são encontrados resultados de pesquisa na usinagem de madeira maciça onde o crescimento das componentes de força de usinagem se dá de forma praticamente linear, dentro de certos limites de avanço [Gonçalves et alii, 1998]. De uma forma geral, verifica-se que apenas para avanços muito pequenos as forças de corte e de avanço tendem a comportar-se não linearmente, enquanto que a partir de um certo valor de avanço este crescimento torna-se praticamente linear, e também que as forças de avanço tem um crescimento mais acentuado que as forças de corte, à medida que os avanços tornam-se maiores.

Assim como na usinagem convencional de materiais metálicos, na usinagem das madeiras maciças ensaiadas o avanço mostra ter uma significativa influência sobre as componentes da força de usinagem. Esta influência mostra-se, de maneira geral, sob a forma de um crescimento linear, levemente degressivo, no nível de forças para incrementos de avanço (**Figura 25, Figura 26**), que entretanto apresenta algumas particularidades para cada diferente espécie ensaiada. Apesar destas particularidades no comportamento das forças em relação ao avanço, algumas generalizações podem ser feitas. Verifica-se, por exemplo, que incrementos no avanço exercem uma influência mais marcante sobre as forças de usinagem para a espécie *Eucalyptus dunnii* do que para as espécies de *Eucalyptus grandis* e Rotbuche (**Figura 25, Figura 26**).

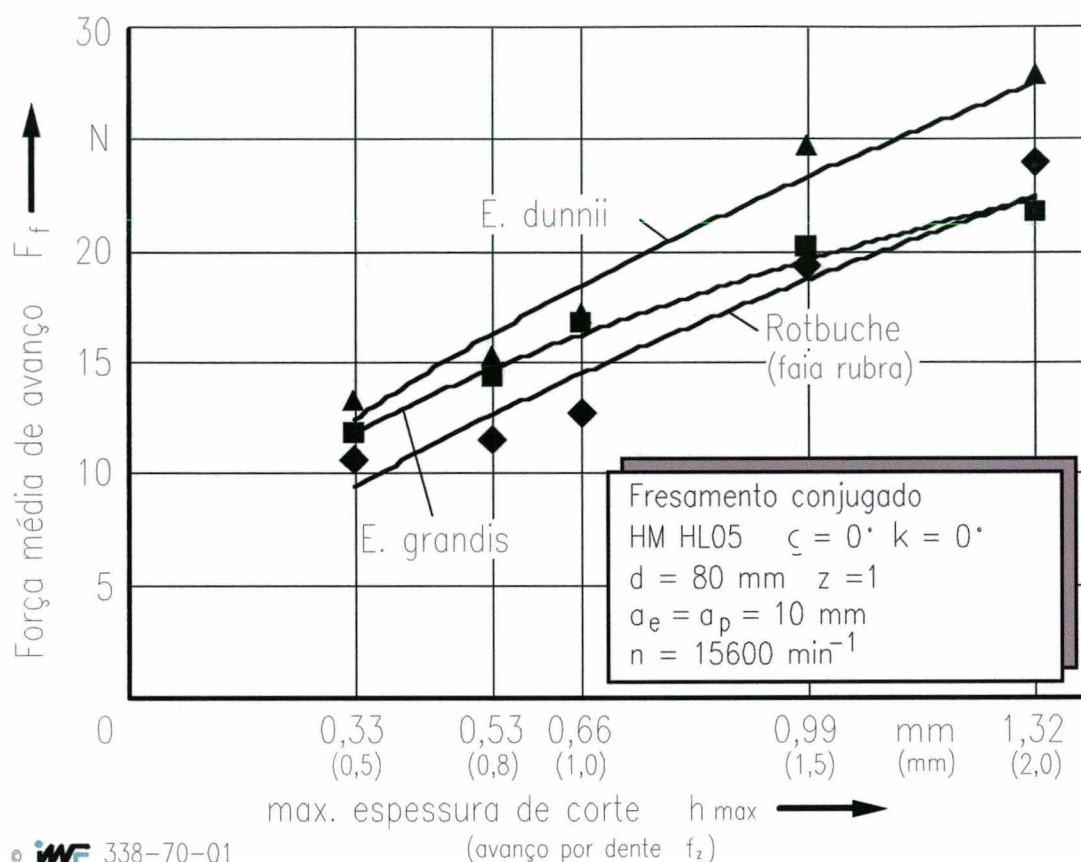
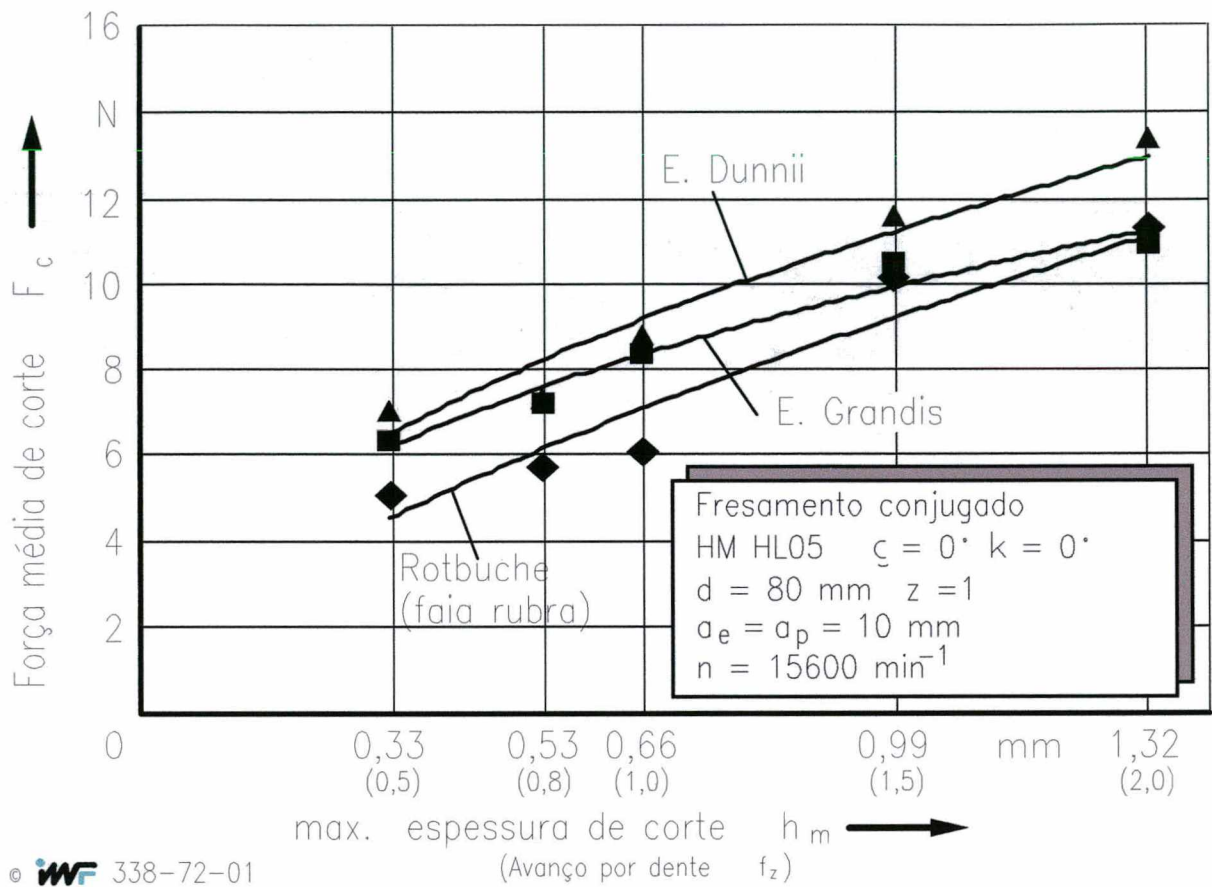


Figura 25 – Influência do avanço por dente sobre a força média de avanço para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii* e Rotbuche.

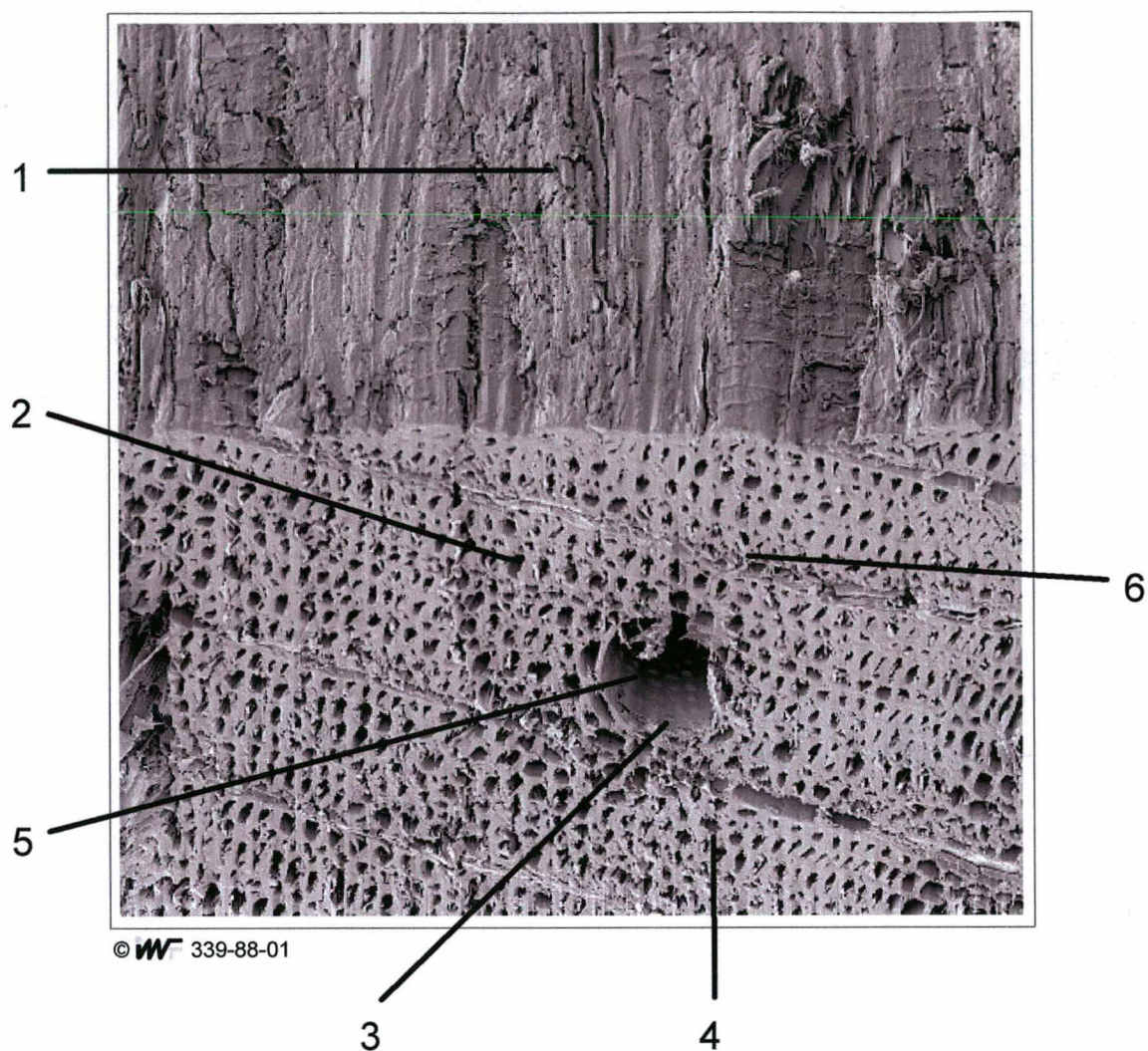
Com relação a análise do comportamento da força de usinagem no fresamento de espécies de mesma família ensaiadas neste trabalho, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, verifica-se uma sensível relação com a densidade da madeira. Semelhantemente, ao que ocorre com as forças de avanço, também as forças de corte sofrem influência, além do avanço, da estrutura macroscópica do material (**Figura 27**, **Figura 28**). Para a espécie *E. dunnii*, espécie mais densa, as forças de usinagem são maiores quando comparadas com a espécie menos densa, *E. grandis*.

Quando a análise é realizada entre espécies de diferentes famílias, percebe-se a influência da anatomia da madeira sobre os resultados de força de usinagem. A espécie Rotbuche apresentar uma densidade maior do que as espécies de eucalipto, mas dominada por uma diferente estrutura macroscópica (**Figura 29**) descrita pelo comprimento de fibras comparativamente mais curtas, o que implica em uma menor força interna de ligação, apresenta tanto as forças de corte como de avanço relativamente menores do que para as espécies de Eucalipto.



© W 338-72-01

Figura 26 – Influência do avanço por dente sobre a força média de corte para as espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii* e *Fagus Sylvatica* (Rotbuche).



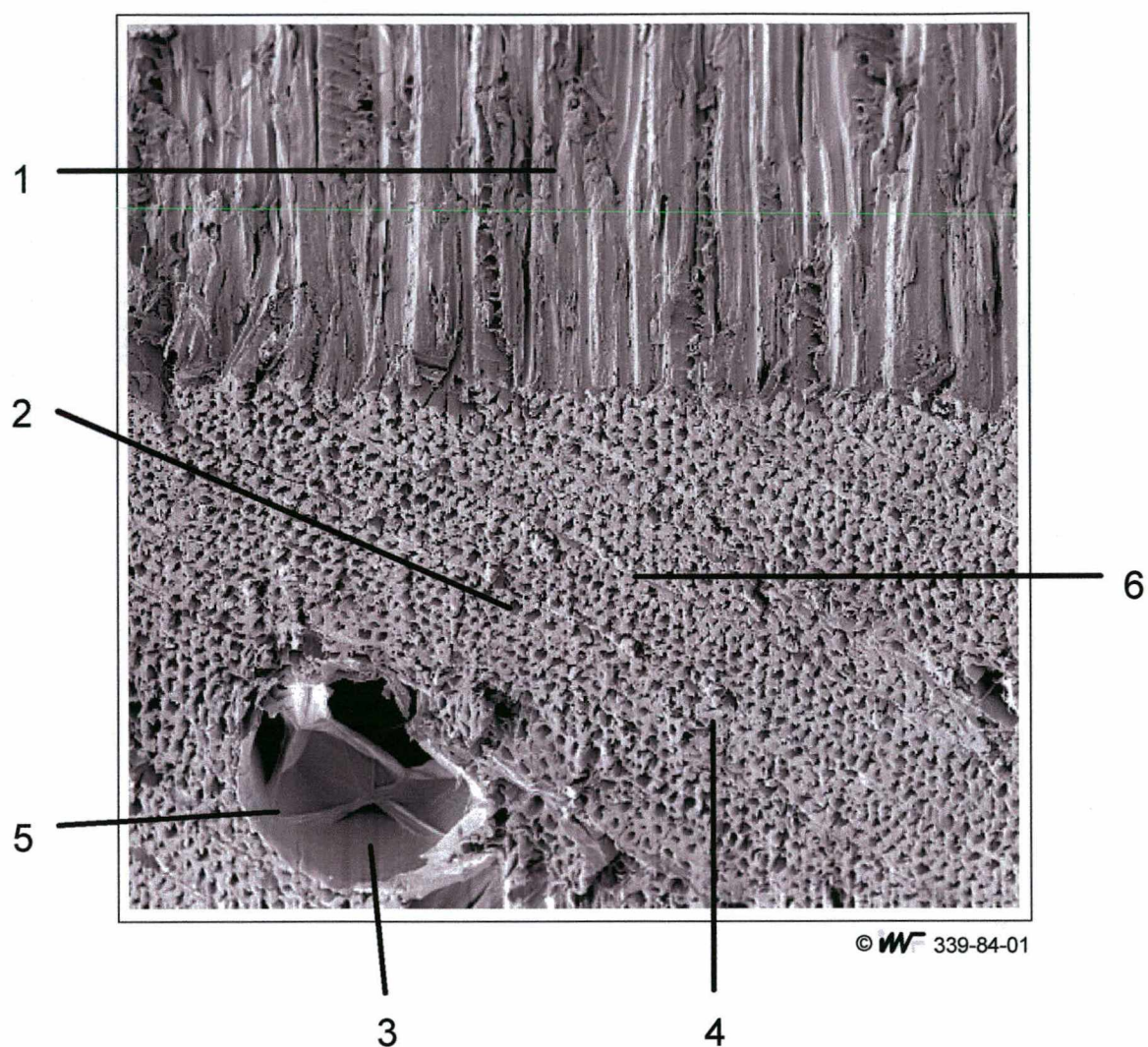
- 1 Corte radial
- 2 Traqueídeos
- 3 Vasos
- 4 seção transversal
- 5 Poros
- 6 Parênquima radial

E. grandis

Ampliação: : 150 X

 $l_f = 1400 \text{ m}$ $f_z = 1,5 \text{ mm}$

Figura 27 – Construção macroscópica da espécie *Eucalyptus grandis*



- 1 Corte radial
- 2 Traqueídeos
- 3 Vasos
- 4 Seção transversal
- 5 Poros
- 6 Parênquima radial

E. dunnii

Ampliação: 150 X

$I_f = 800 \text{ m}$

$f_z = 1,5 \text{ mm}$

Figura 28 – Construção macroscópica da espécie *Eucalyptus dunnii*.

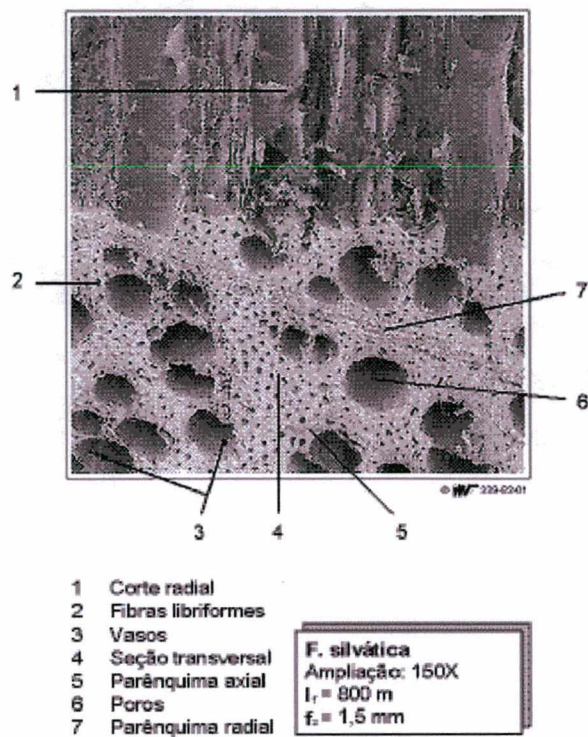


Figura 29 – Construção macroscópica da espécie *Fagus silvática*.

A força resultante, denominada de força ativa, para o processo de fresamento conjugado de *E. grandis*, *E. dunnii* e Rotbuche são mostradas na **Figura 30**.

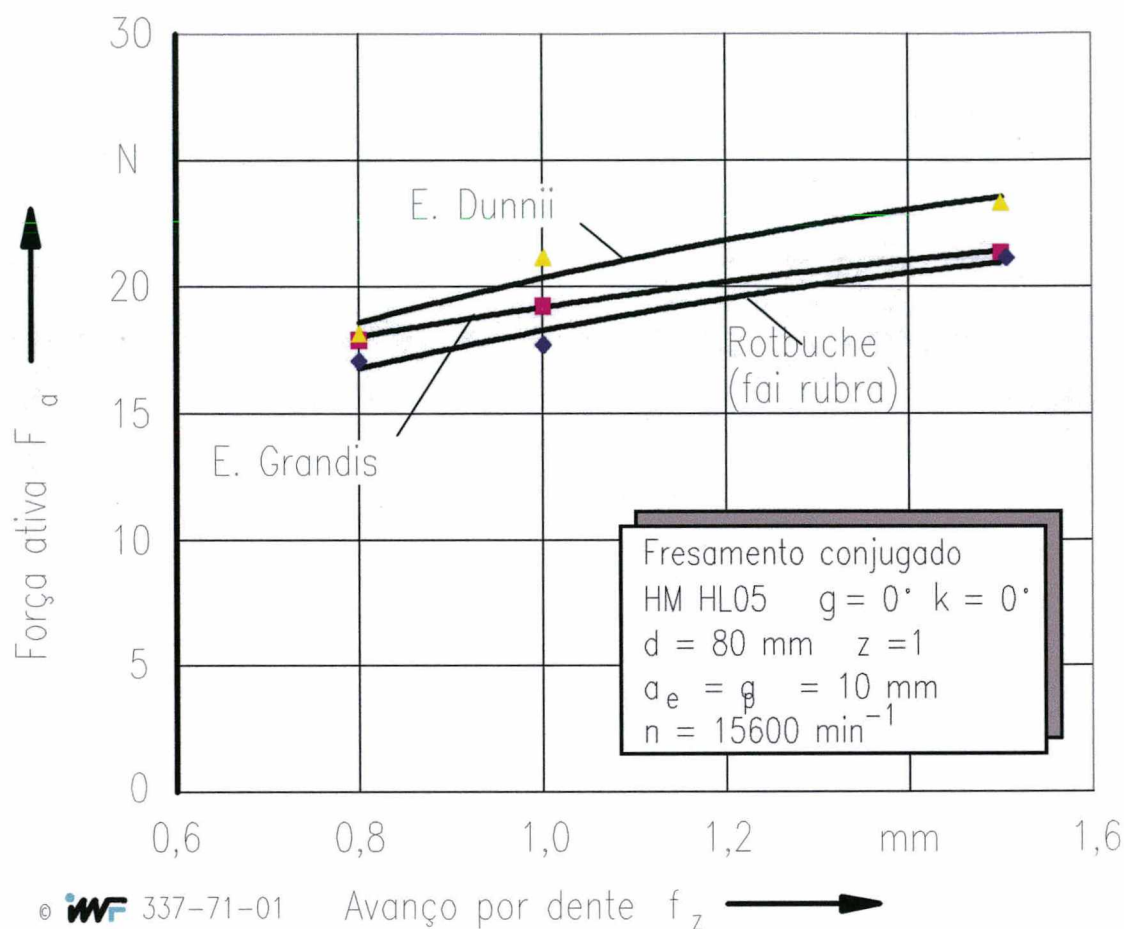


Figura 30 – Influência do avanço por dente sobre a força ativa para *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii* e *Fagus Sylvática* (Rotbuche).

A determinação e a análise da força específica de corte para as diferentes espécies é discutido detalhadamente a seguir.

5.1.3. DETERMINAÇÃO DA FORÇA ESPECÍFICA SEGUNDO KIENZLE

Força de corte

Através de ensaios nos três tipos de madeiras Rotbuche, E. dunnii e E. grandis foram determinadas segundo as direções X e Y da plataforma piezelétrica as componentes de força para o processo de fresamento conjugado. No processo de fresamento, entretanto, não existe nenhum valor constante para as forças de corte, mas sim dependentes do tempo bem como também do ângulo de ataque φ da trajetória da força. Podem ser empregados para o cálculo da força específica segundo Kienzle, tanto a força média como a força máxima de corte. Com isto devem

ser usados ou a correspondente espessura média de usinagem h_m ou a espessura máxima h_{\max} de usinagem.

Com o auxílio da equação [1] podem ser convertidas as componentes de força diretamente medidas em valores da força de corte F_c necessárias para o respectivo cálculo da força específica.

$$F_c(\varphi) = F_x(\varphi) \cdot \cos \varphi - F_y(\varphi) \cdot \sin \varphi \quad (21)$$

A máxima força de corte calculada a partir da força de corte média diretamente medida, é obtida segundo a equação [20]:

$$F_{c\max} \approx \bar{F}_c \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{z \cdot \varphi_e} \quad (22)$$

Espessura de usinagem

As forças de corte devem ser determinadas a partir do emprego de diferentes avanços por dente. A conversão dos valores do avanço por dente em valores da espessura de usinagem derivam da seguinte igualdade

$$h = f_z \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa_r \quad (23)$$

Segundo cada caso, se para o cálculo dos valores da espessura máxima (h_{\max}) ou da espessura média de usinagem (h_m), se utiliza uma das seguintes equações:

$$h_{\max} = f_z \cdot \sin \varphi_e \cdot \sin \kappa_r \quad (24)$$

$$h_m = f_z \cdot \sin \frac{\varphi_e}{2} \cdot \sin \kappa_r \quad (25)$$

Avaliação e investigação pelo método gráfico

Para a avaliação dos valores levantados na realização dos ensaios e para a determinação da força específica de corte estão disponíveis duas possibilidades.

Na primeira, dever ser descrito segundo o método tradicional [KÖNIG, 1990] e aplicado por meio de um gráfico.

Na correspondente **Figura 31** foram plotados os valores de força de corte levantados nos ensaios correlacionados com a espessura de usinagem no respectivo padrão bilogarítmico. A seguir, uma reta é traçada sobre os pontos de medição. Pelo método de extrapolação da espessura de usinagem $h=1\text{mm}$ se determina o valor principal da força específica de corte. A tangente do

ângulo entre a reta e o eixo X é o valor desejado do expoente $(1-m_c)$. Com este processo deve-se considerar, que ambos os eixos do sistema de coordenadas bilogarítmico têm que possuir o mesmo padrão para evitar falsificar a inclinação da reta.

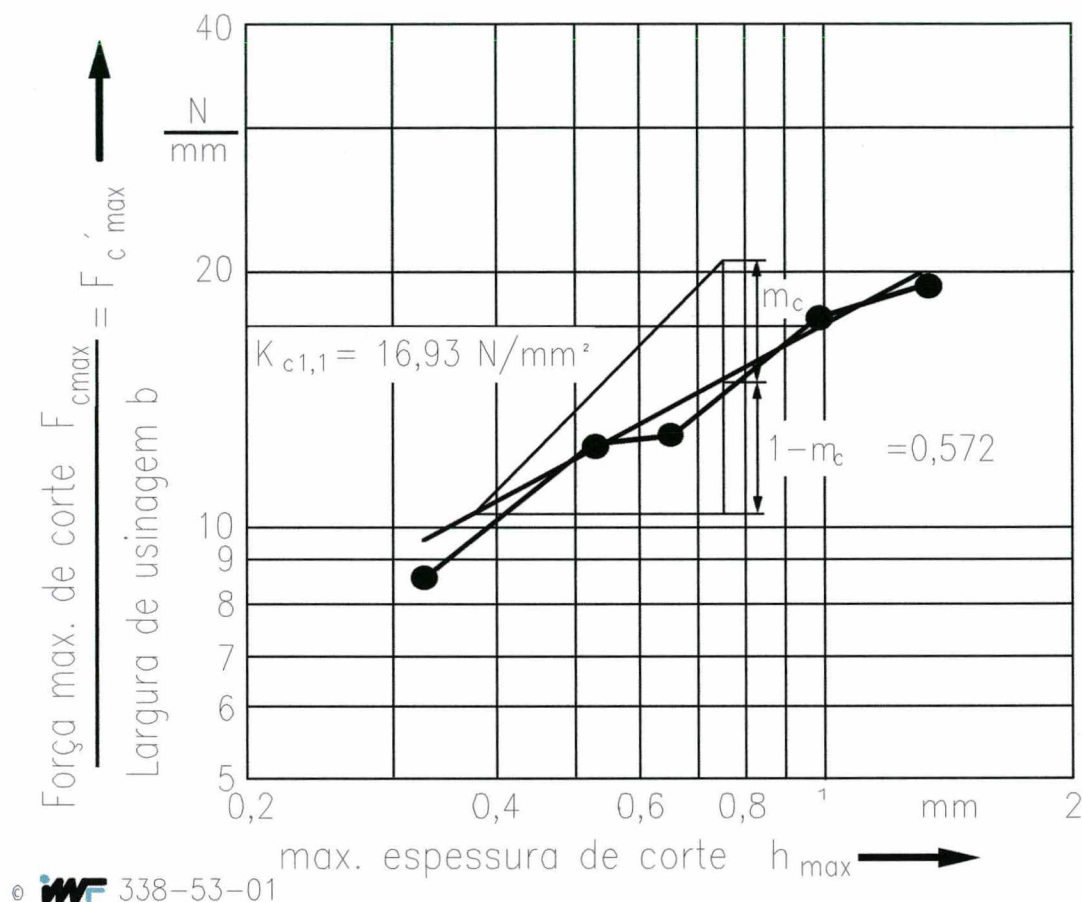


Figura 31 – Força de corte específica em dependência da máxima espessura de usinagem para *Eucalyptus grandis*.

Segundo Könnig [1990] pode-se determinar a inclinação da reta $(1-m_c)$ também pela aplicação gráfica de um triângulo equilátero (**Figura 32**).

A segunda possibilidade para a avaliação dos resultados de medição consiste na ajuda de um planilha eletrônica (MS Excel), onde os dados lidos pelo sistema de medição também são representados na forma bilogarítmica (**Figura 32**).

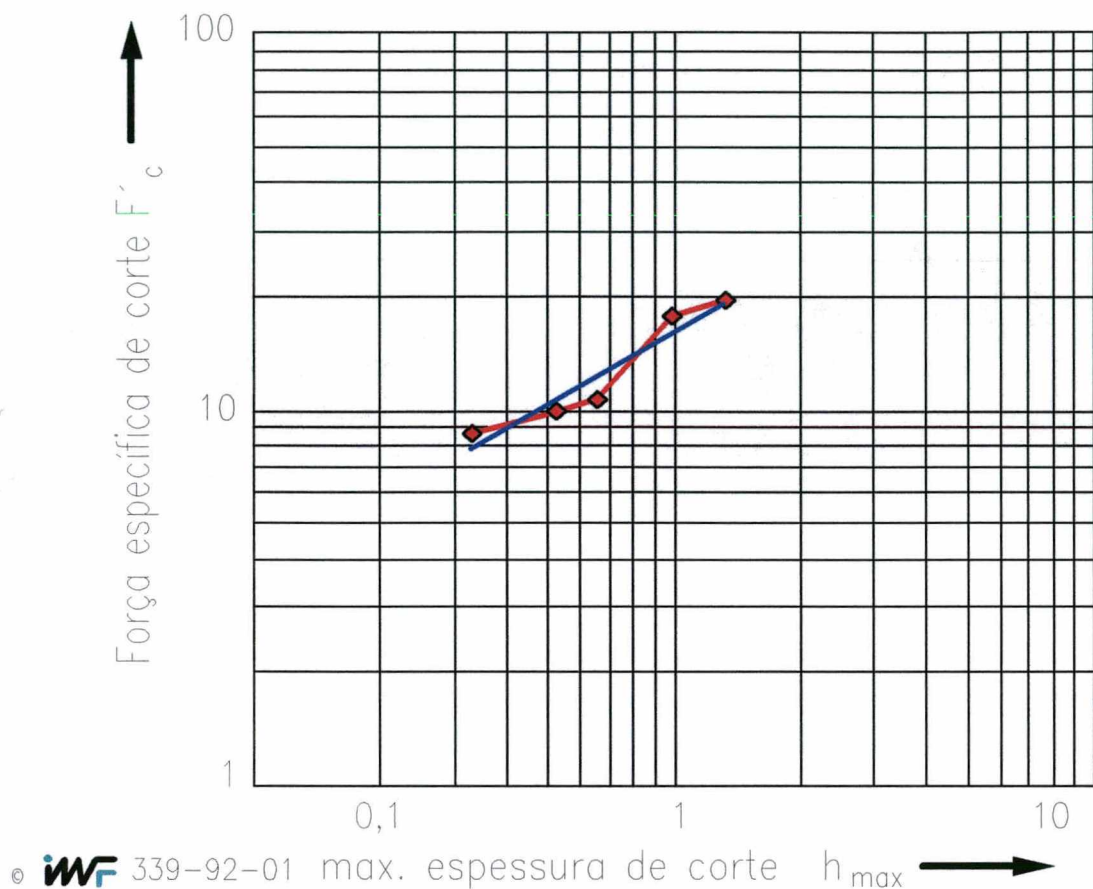


Figura 32 – Tendência da reta inclusive a equação da reta para a força de corte específica.

Pela regressão dos valores plotados existe a possibilidade da apresentação da tendência do comportamento. Esta tendência, na representação bilogarítmica é representada como uma reta, a qual determine para $h=1$ mm o valor da força específica de corte $k_{cl,1}$ e pela inclinação o expoente $(1-m_c)$.

Segundo Jostmeier [1966] também é representado graficamente ao lado da aplicação de F'_c em correlação com a largura de usinagem b a força específica de corte k_c em dependência de h . Para este propósito, se usa a equação [18] do capítulo 2 na forma:

$$F_c = k_c \cdot h \cdot b \quad \text{com } k_c = \frac{k_{cl,1}}{h^m}$$

$$k_c = \frac{F_c}{h \cdot b} \quad (26)$$

Uma representação bilogarítmica de k_c é mostrada na **Figura 33**.

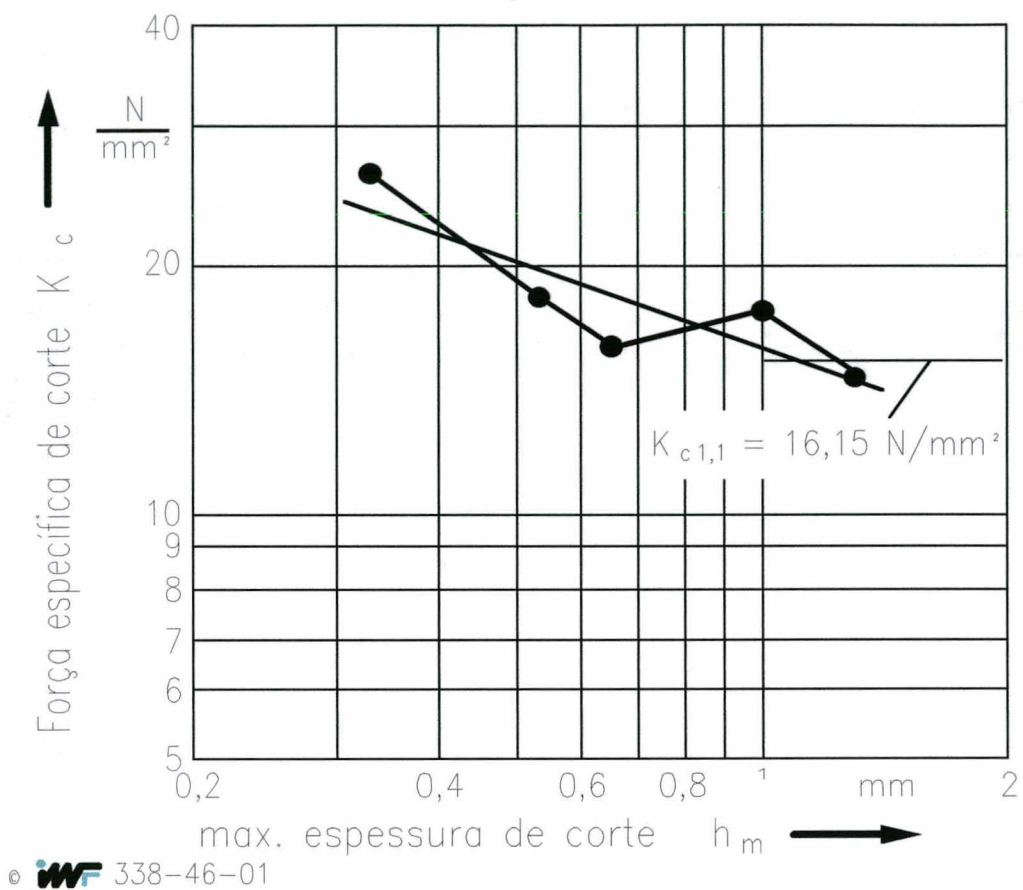


Figura 33 –Força específica de corte em dependência da espessura de usinagem.

Resultados

Para as investigações realizadas para o processo de fresamento conjugado de topo e periférico de três espécies de madeira *Fagus Sylvática* (Rotbuche), *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* resultaram os seguintes valores de força de corte mostrados na **tabela 3**.

Tabela 3: Valores da força de corte para o fresamento de Rotbuche, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.

		$F_{c'_{max}}$ (N/mm)	$F_{c'_{max}}$ (N/mm)	$F_{c'_{max}}$ (N/mm)
f_z (mm)	h_{max} (mm)	Rotbuche	E. Grandis	E. Dunnii
0,5	0,34	8,73	8,73	12,39
0,8	0,53	9,95	12,56	12,74
1,0	0,66	10,64	12,74	15,36
1,5	0,99	17,80	17,63	20,24
2,0	1,32	19,72	19,2	23,38

Estes valores podem ser resumidos de acordo com as informações levantadas no seguinte gráfico (**Figura 34**):

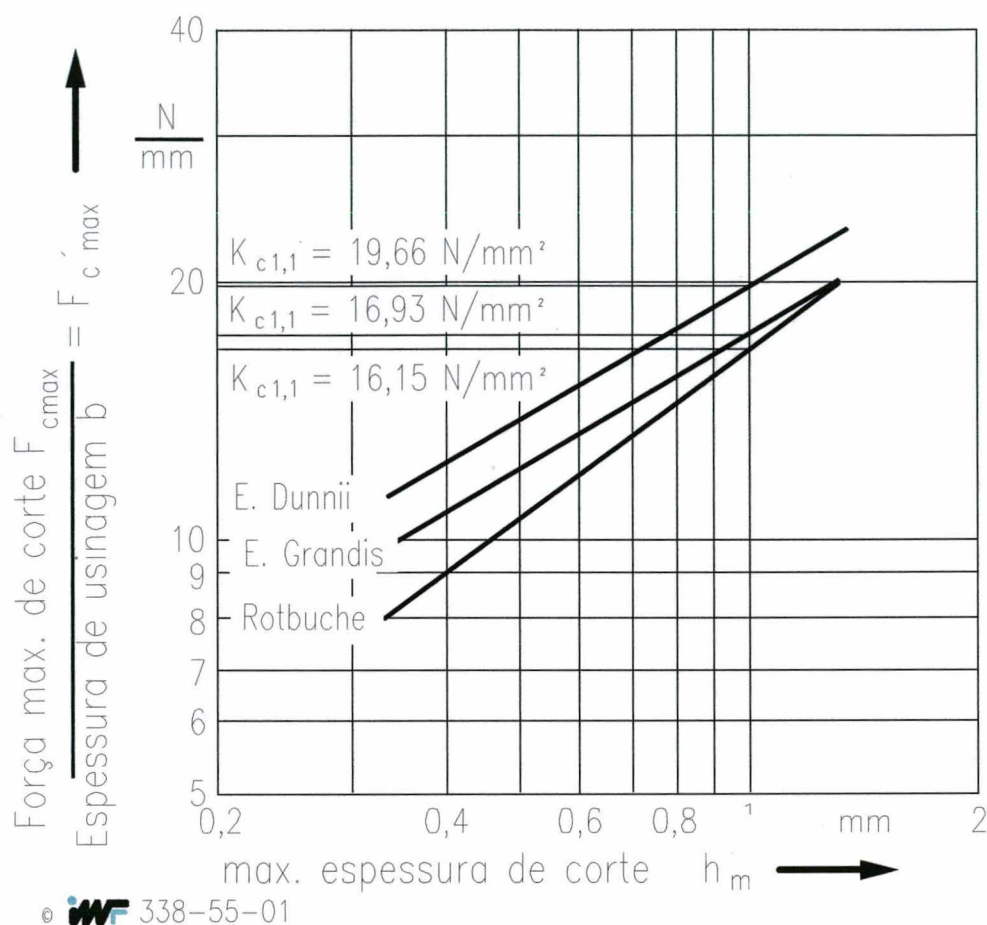


Figura 34 – Força específica de corte /largura de usinagem em dependência da espessura de usinagem máxima para *Fagus Sylvática* (Rotbuche), *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.

A **tabela 4** mostra os valores calculados para o valor principal da força específica de corte através da planilha eletrônica „EXCEL“, bem como os expoentes para as respectivas equações de Kienzle para as diferentes espécies investigadas.

A partir da análise dos dados da **tabela 4**, conclui-se que as madeiras de Eucalipto possuem relativamente um grau de dependência maior da variação do avanço do que a madeira de Rotbuche .

Quando comparadas as três diferentes espécies pode-se observar que o *Eucalyptus dunnii* possui a maior pressão específica $k_{c1,1}$ em relação as outras duas espécies.

Entre as duas espécies da mesma família, o *Eucalyptus grandis* apresenta melhor desempenho (melhor índice de usinabilidade) do que o *Eucalyptus dunnii* quando avaliada a força de corte.

As espécies *Eucalyptus grandis* e *Fagus Sylvática* (Rotbuche), apesar de possuírem densidades diferentes, apresentaram comportamento semelhante, com valores de força de corte específico muito próximos, justificado pelas diferentes estruturas anatômicas. Isto é um dado altamente positivo para a madeira de *Eucalyptus grandis*, tratando-se como uma alternativa a substituição da madeira de Rotbuche, considerada a madeira “nobre” pela indústria moveleira na Europa e nos Estados Unidos.

Tabela 4: Valores principais da força específica de corte e os respectivos expoentes da equação de Kienzle (Werkstoffe: Material do corpo de prova)

Espécie	$k_{c1,1}$ [N/mm ²]	$1-m_c$
Rotbuche (faia rubra)	16,15	0,65
<i>Eucalyptus grandis</i>	16,93	0,57
<i>Eucalyptus dunnii</i>	19,66	0,499

Os valores de “ $k_{c1,1}$ ” e “ $1-m_c$ ” determinados a partir das medições de força de corte na direção paralela às fibras para as condições preestabelecidas poderão ser empregados para o cálculo da potência necessária em processos de usinagem de madeira, considerando uma certa correspondência dos parâmetros de corte com aqueles adotados na experimentação, dentre a densidade da madeira, o teor de umidade e o ângulo de saída da ferramenta.

A representação das forças de corte específicas para as espécies investigadas neste trabalho estão mostradas na **Figura 35**.

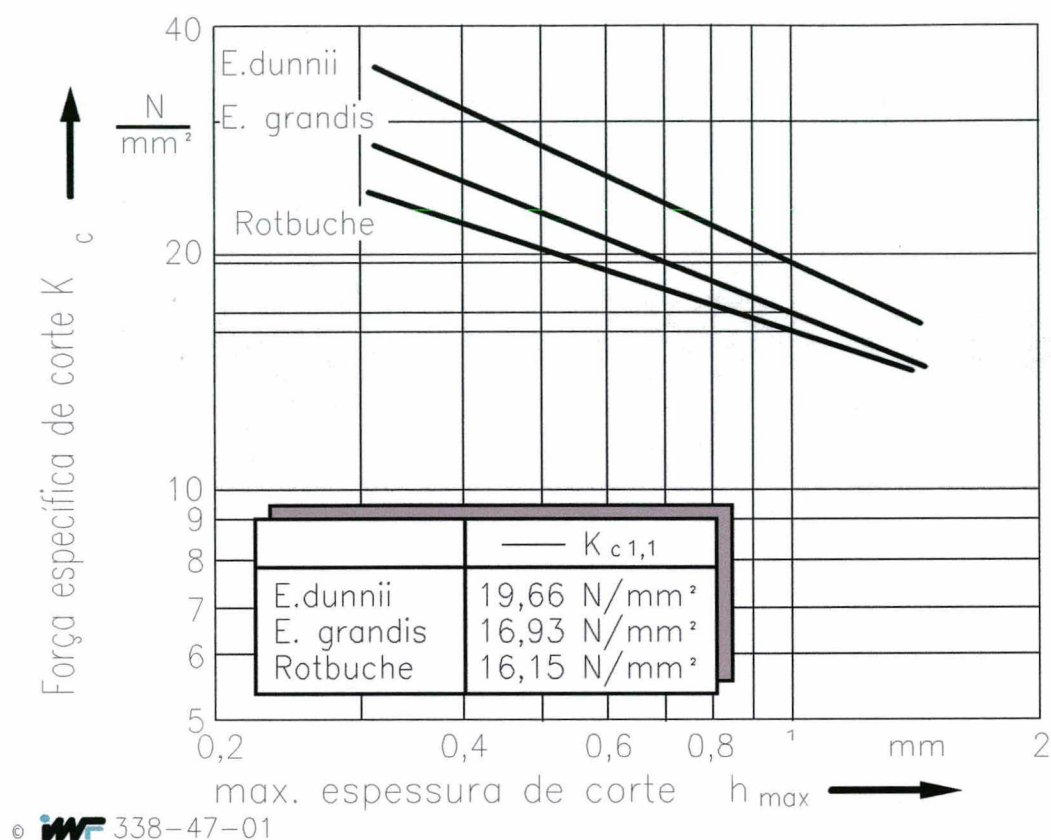


Figura 35 –Força específica de corte em dependência da espessura de usinagem máxima para *Fagus Sylvática* (Rotbuche), *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.

5.2. INFLUÊNCIA SOBRE A TEXTURA SUPERFICIAL

Para a verificação da influência do avanço sobre o acabamento superficial de superfícies geradas com ferramentas de metal duro, é usual a realização de ensaios sistemáticos para diferentes valores de avanço, medindo-se posteriormente a rugosidade e analisando-se os demais danos superficiais porventura existentes.

Ambos, clientes e profissionais da indústria de processamento de madeira, classificam entre uma estrutura natural e outra com impressão causada pelo processo de usinagem. Uma distinção entre a estrutura superficial específica da madeira (característica anatômica da madeira) e a topografia característica originada na usinagem de madeira não pode ser feita com um único perfil de rugosidade. Valores convencionais de rugosidade são baseadas em imagens de perfil em duas dimensões.

Um desses métodos é a estimativa direta da qualidade da superfície. Para isso, é possível usar valores convencionais de rugosidade. Para pequenos poros, como os em madeira, os valores da curva de Abbot (R_k , R_{vk} , R_{pk}) são obtidos sob certas précondições, como foram usados por Westkämper e Riegel, Westkämper e Schadoffsky, e informam em suas publicações que os valores de R_a e R_z medidos na superfície fresada correspondem aos resultados estimados na indústria. O descaso da rugosidade específica da madeira não permite, entretanto, a comparação direta da rugosidade produzida na usinagem para diferentes espécies de madeira.

Com o emprego do novo método de análise quantitativa da textura superficial de madeiras maciças desenvolvido pelo IWF-Braunschweig pode-se comparar resultados de rugosidade para as duas diferentes famílias com três diferentes espécies com uma enorme segurança.

Na usinagem de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, entretanto, não existem ensaios sistemáticos e sua posterior análise e faltam conhecimentos sobre a influência que os parâmetros de usinagem e as variáveis do processo têm sobre o resultado final de trabalho.

Neste trabalho, os corpos de prova de *Fagus Sylvática* (Rotbuche), *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* estavam sistematicamente e uniformemente preparados para a garantia de resultados de teste de reprodutibilidade. Por alinhamento apontado dos corpos de prova sobre a plataforma piezelétrica segundo o sentido tangencial longitudinal e uma sucessão sólida de seções vizinhas dentro de um mesmo caibro de madeira segundo a orientação de crescimento da árvore, onde também influências condicionadas a produção no tratamento dos resultados mais extenso é eliminado.

O processo de filtragem denominado de „filtro de poros“ [SCHADOFFSKY, 1996], desenvolvido pelo IWF - Braunschweig, foi então empregado para a análise do parâmetro rugosidade. Este processo de filtragem é semelhante ao processo de filtragem especial segundo a Norma DIN 4776 construído em vários níveis. A rugosidade estrutural e a rugosidade originada pelo processo de fabricação são separados um do outro pelo perfil de medição (**Figura 36**).

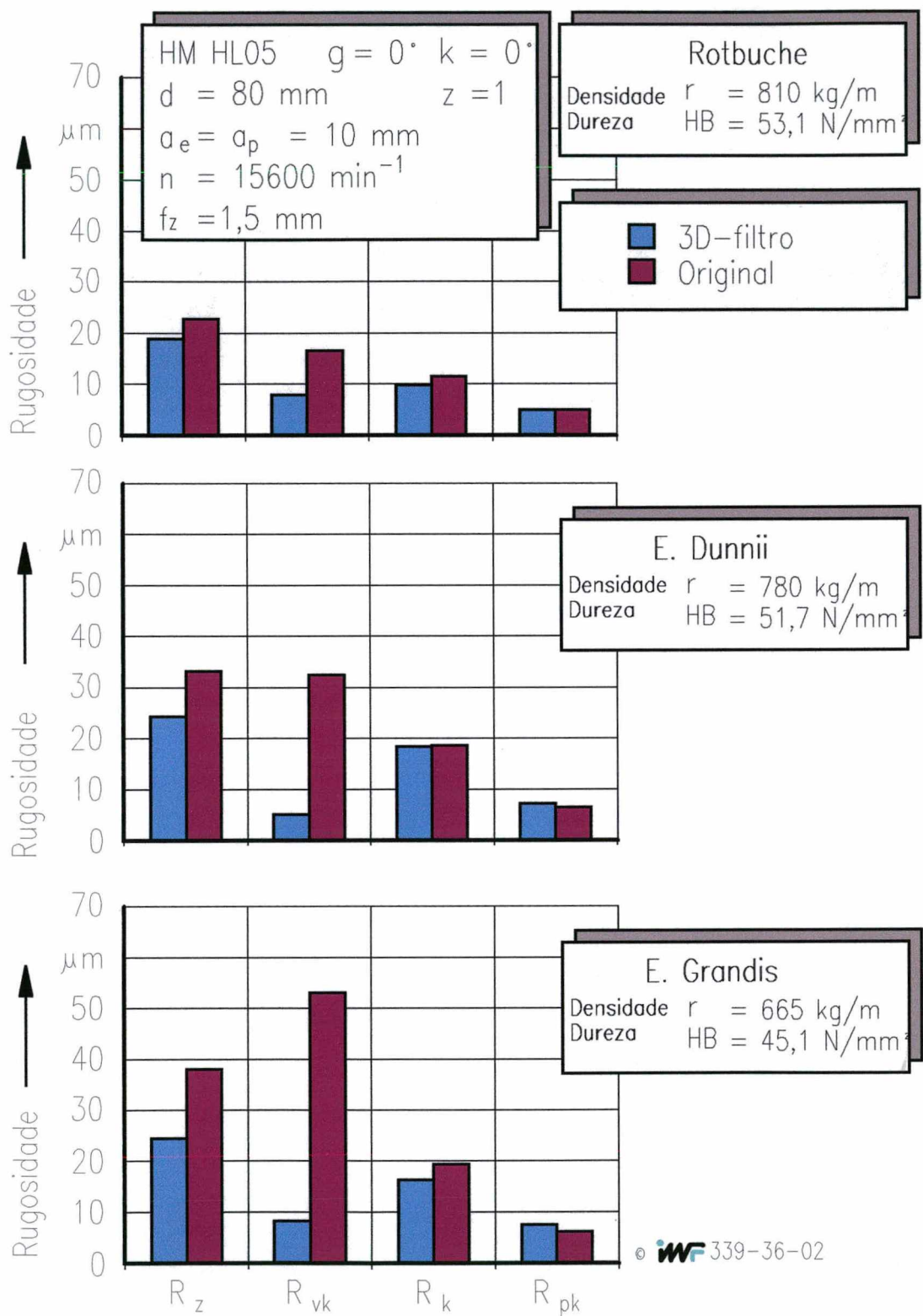


Figura 36 – Rugosidade de diferentes tipos de madeira para o processo de fresamento periférico medido no sentido transversal da fibra

A automação da medição e processos de estimativa, depois de ajustados para o trabalho, foram realizados com relativo sucesso. O problema básico é o tempo no qual é preciso para

medir a superfície. Isto é devido ao regime de avanço comumente usado nos aparelhos de medição de rugosidade. Além do mais, o número de perfis registrados por corpo de prova eram muito elevados. Foram registrados por medição 100 perfis de rugosidade, em dependência da aplicação e a demanda da precisão.

O resultado da influência da velocidade de avanço v_f respectivamente o avanço por dente f_z sobre os parâmetros de rugosidade medidos no sentido transversal está representado na **Figura 37** para as madeiras de *Fagus Sylvática* (Rotbuche), *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.

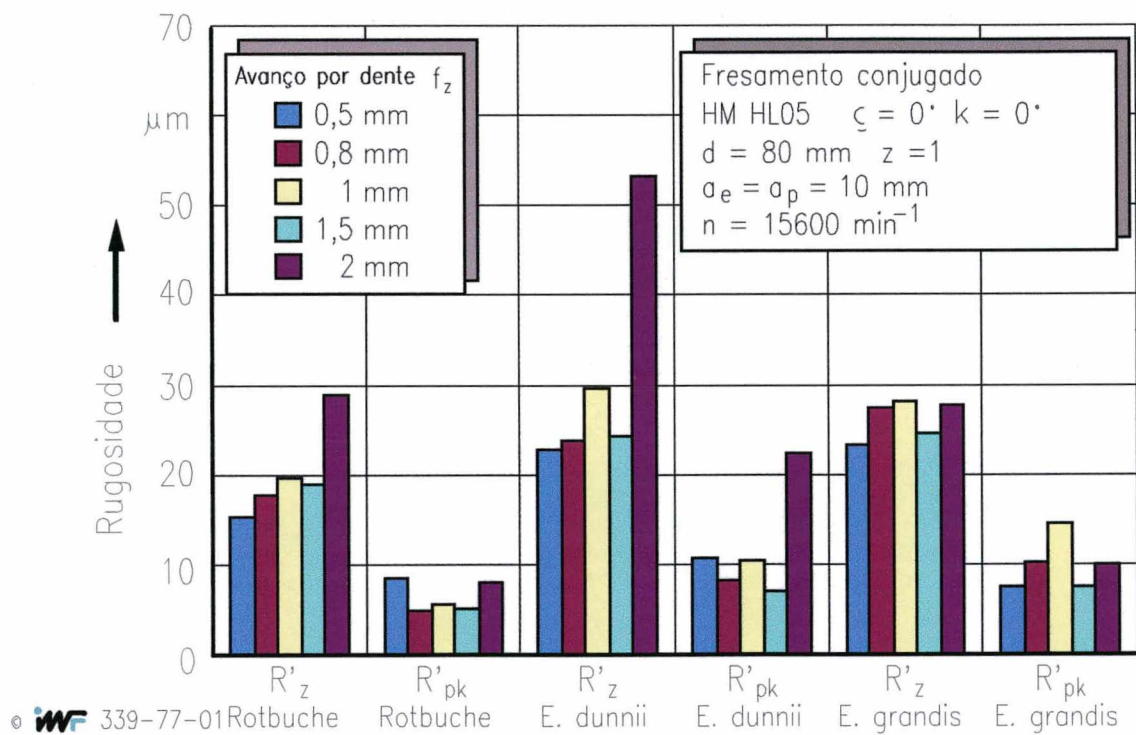


Figura 37 – Influência de diferentes avanços por dente sobre Rugosidade.

A influência do avanço sobre a rugosidade da superfície usinada das madeiras mostra que até aproximadamente $f_z = 1,5$ mm não ocorre nenhuma variação dos valores R_z e R_{pk} . Isto corrobora com os resultados existentes na usinagem de madeiras de floresta temperada. A literatura mostra que, no fresamento de da maioria das espécies de madeira maciça analisados, para avanços superiores a 1,7 mm dificilmente é possível obter superfícies com qualidade de acabamento fino. Avanços maiores que estes são empregados para operações de desbaste, de modo que uma análise da influência do avanço sobre a qualidade superficial para valores de avanço superiores podem trazer importantes informações sobre a profundidade de danos

existentes para grandes avanços e se esta “aspereza” pode ser completamente removida da superfície pela operação de acabamento.

Para avanços por dente $f_z = 2$ mm no fresamento de *Fagus Sylvática* (Rotbuche) e *Eucalyptus dunnii* aumentam visivelmente os valores de rugosidade, o que gera uma correspondente piora da qualidade superficial.

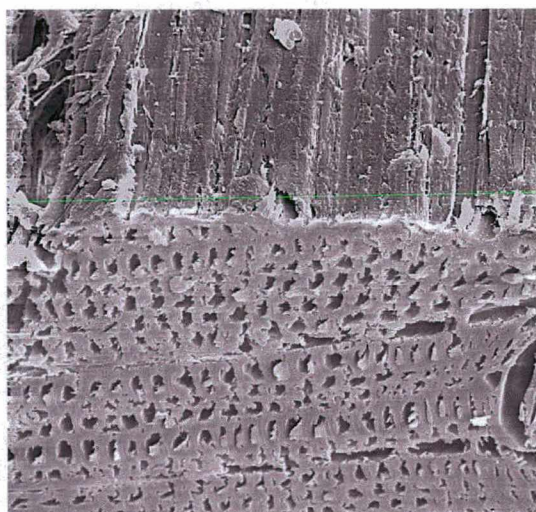
Observa-se, entretanto, que para a madeira de *Eucalyptus grandis*, os valores de rugosidade apresentam pequenas alterações para as variações de avanço, inclusive para a faixa de $f_z = 2$ apresentam valores excelentes. A média dos valores de rugosidade situa-se em um patamar mais elevado, sendo o desvio padrão dos mesmos também maior. Esta constatação é válida devido ao maior diâmetro dos poros (**Figura 27**) presentes na estrutura anatômica quando comparado com as outras duas madeiras (**Figura 28**, **Figura 29**) e que favorece esta importante característica de usinabilidade.

No fresamento de *Eucalyptus dunnii* verificou-se um aumento excessivo dos valores de rugosidade com o aumento do avanço para valores superiores a 1,7 mm no sentido tangencial longitudinal, que pode ser justificado pelo comprimento das fibras comparativamente maior do que as fibras de *Fagus Sylvática* (Rotbuche).

Segundo estudos do SENAI/CETEMAM e EMBRAPA [1998], os principais defeitos de usinagem para algumas madeiras de eucalipto analisados por inspeção visual foram o levantamento das fibras e o arrepiamento da superfície. O defeito “levantamento de fibras” pode ser constatado pela análise dos valores medidos de R_{pk} para as espécies *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*. O arrepiamento da superfície somente foi verificado para a espécie *Eucalyptus dunnii* com teores de umidade acima de 30%.

Verificou-se que para a espécie Rotbuche, embora possua um comprimento de fibras menor, ocorreu um perceptível aumento do valor de rugosidade R_{pk} para o avanço $f_z = 0,5$ mm. Este aumento pode ser causado, entre outros fatores, pela modulação de vibrações de baixa frequência que ocorrem na superfície gerada em consequência de sua maior densidade e conseqüente resistência ao corte.

A observação visual através da microscopia eletrônica permite analisar uma forte deterioração da qualidade superficial para valores de avanço $f_z = 1$ mm no fresamento de *Eucalyptus grandis*, o que confirma os valores de rugosidade R_{pk} medidos.

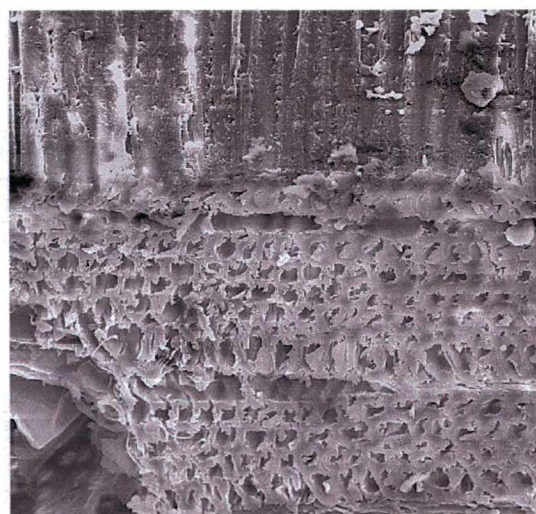


E. grandis

Ampliação: 350 X

$l_f = 6 \text{ m}$

$f_z = 0,8 \text{ mm}$

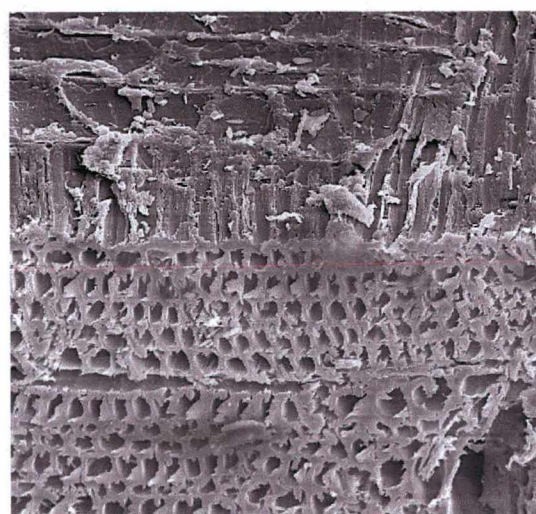


E. grandis

Ampliação: 350 X

$l_f = 6 \text{ m}$

$f_z = 1,0 \text{ mm}$



E. grandis

Ampliação: 350 X

$l_f = 6 \text{ m}$

$f_z = 1,5 \text{ mm}$

© WFF 339-87-01

Figura 38 – Eucalyptus grandis em função do emprego de diferentes valores de avanço por dente.

A alta dinâmica do processo, causada principalmente por vibrações na força de usinagem desta espécie pode explicar por sua vez as dispersões existentes nos valores de rugosidade R_{pk} .

Observa-se que com o fresamento no sentido longitudinal a favor das fibras para as três espécies analisadas obtém-se um excelente acabamento, principalmente na face tangencial, sem consumo elevado de energia quanto ao corte da ferramenta e do avanço do material.

O estudo comparativo no processo de fresamento em altas velocidades entre os resultados de medição da textura superficial de madeiras de floresta plantada e de floresta temperada utilizando essa nova técnica de medição contribui para fornecer dados tecnológicos com informações sobre as diferenças estruturais entre as alternativas florestais oferecidas pelo mercado de floresta plantada do Brasil, permitindo a otimização do processo produtivo tanto para a indústria moveleira como para a florestal.

5.3. ANÁLISE SOBRE A VIDA DA FERRAMENTA

Diversos pesquisadores envolveram-se nos últimos anos com a análise da influência do desgaste de ferramentas de metal duro sobre as componentes de força na usinagem convencional de madeiras de floresta nativa e alguns trabalhos sobre madeiras de floresta plantada. A importância deste estudo reside no fato de que, com o incremento das forças que normalmente é possível observar à medida que progride o desgaste em uma ferramenta, ocorrem aumentos da potência necessária para promover a remoção do material durante o processo, o que por sua vez causa, conseqüentemente, maiores problemas com a qualidade de forma da peça em função da deformação das camadas subsuperficiais. Também o aumento das vibrações causado por maiores forças na usinagem pode levar a uma diminuição na qualidade final da peça, por aumento na rugosidade.

Através da observação do comportamento da grandeza e direção da força de usinagem é possível monitorar o desgaste da ferramenta também na usinagem de madeiras maciças, de modo que em alguns casos o nível da componente de usinagem pode ser adotado como um critério para definir indiretamente o fim de vida de uma ferramenta. Este comportamento das forças em função do desgaste deve, entretanto, ser estudado para os diferentes materiais usinados e condições de trabalho, visto que os mecanismos de desgaste não idênticos para todos os materiais nem as exigências de qualidade final de trabalho são as mesmas para todos os casos. Assim sendo, o nível das forças de corte, bem como o seu comportamento dinâmico, têm

também particularidades para cada caso de fabricação através da tecnologia de usinagem madeiras e seus compostos.

Através de ensaios sistemáticos, o processo de desgaste dos gumes das ferramentas foram analisados de acordo com as condições típicas de usinagem empregadas pela indústria. Na forma de ensaios de referência (pré-ensaios) foram usinadas os corpos de prova previamente selecionados segundo intervalos padronizados, com a finalidade de estimar através de medição objetiva a qualidade superficial desejada para cada caso. Simultaneamente, também, foram medidos o desgaste do gume ($S_v\gamma$) para cada ferramenta utilizada.

Como parâmetros de usinagem foram selecionados para todos os ensaios realizados uma rotação de $n = 15600$ 1/min e um avanço por dente de $f_z = 1,5$ mm ($v_f = 23,4$ m/min). A profundidade de corte escolhida é de 10 mm em todos os casos e, conseqüentemente, equívale a um percurso de corte (usinagem) l_c de 28,9 vezes o percurso de avanço. Foram observados o gume da ferramenta de metal duro sempre com a mesma geometria. Os intervalos para a medição e observação do desgaste foram realizados em todos os casos para 0, 6, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 e 1400 m de percurso de avanço.

Uma influência geral da grandeza densidade sobre o desgaste do gume da ferramenta não pôde ser determinada e não era também esperado. Ao contrário, o teor de material inorgânico como SiO_2 e oxalato de cálcio presente para cada espécie de madeira tem uma influência decisiva, especialmente para a madeira de *Eucalyptus* [Braz, 1971].

Através dos resultados apresentados na **Figura 39**, **Figura 40**, **Figura 41** e **Figura 42** pode-se observar que o processo de desgaste do gume da ferramenta na usinagem das duas qualidades de madeira de eucalipto ocorre relativamente mais rápida que para a madeira de *Rotbuche*. O comportamento da madeira de Eucalipto se mostra mais abrasivo que a de *Rotbuche*.

Na análise das madeiras de Eucalipto da mesma família botânica e do mesmo tipo, a idade representa um papel importante para o esclarecimento do comportamento do desgaste. A madeira de *E. grandis* é 13 anos mais velha que a de *E. dunnii*, aliado ao fato de que o *E. grandis* é mais ácido que o *E. dunnii* tornando-o mais abrasivo (**Figura 39**). Para este tipo de madeira, o deslocamento do gume em relação a face $S_v\gamma$ como critério de fim de vida da ferramenta é muito importante. Pode-se observar que o arredondamento do gume da ferramenta foi mais acentuado na usinagem de *E. grandis* (**Figura 41**, **Figura 42**).

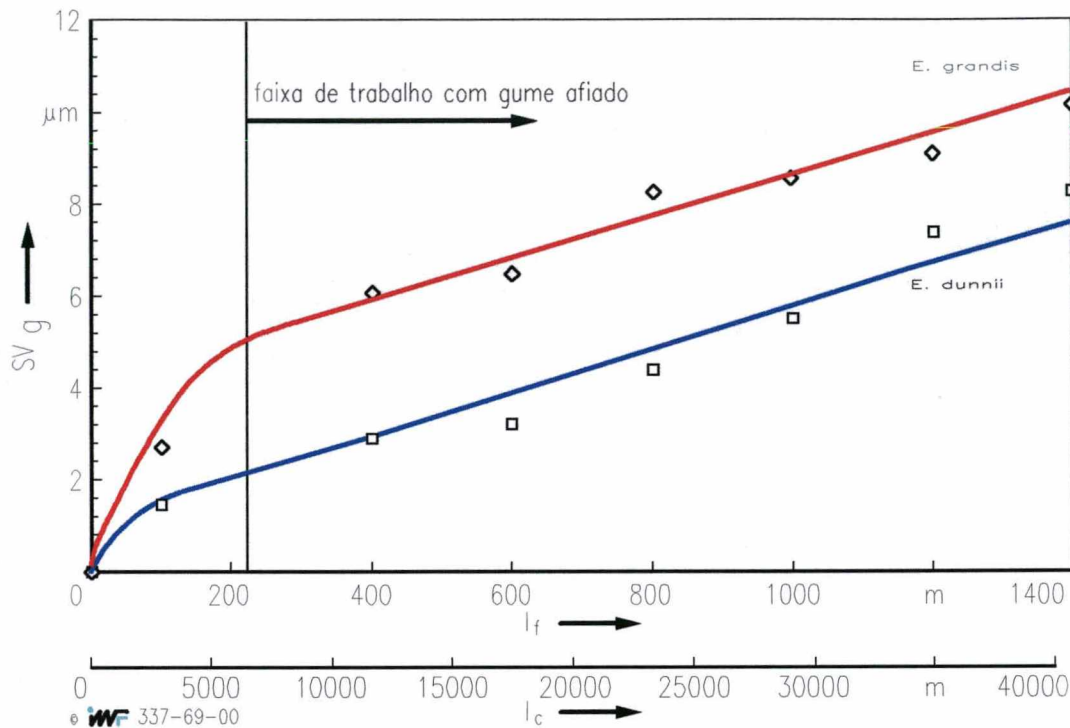


Figura 39 – Análise do desgaste da ferramenta no processo de fresamento conjugado de topo e periférico de Rotbuche, Eucalyptus grandis e Eucalyptus dunni.

Nos ensaios realizados com ferramentas de metal duro no fresamento conjugado da espécie Rotbuche pode-se verificar outro tipo de desgaste, o desgaste de entalhe. O desgaste de entalhe ocorreu no gume secundário e a maior severidade do desgaste se deu na região transitória, ou seja no ponto onde o gume não exerceu mais sua função de corte sobre a peça (Figura 40).

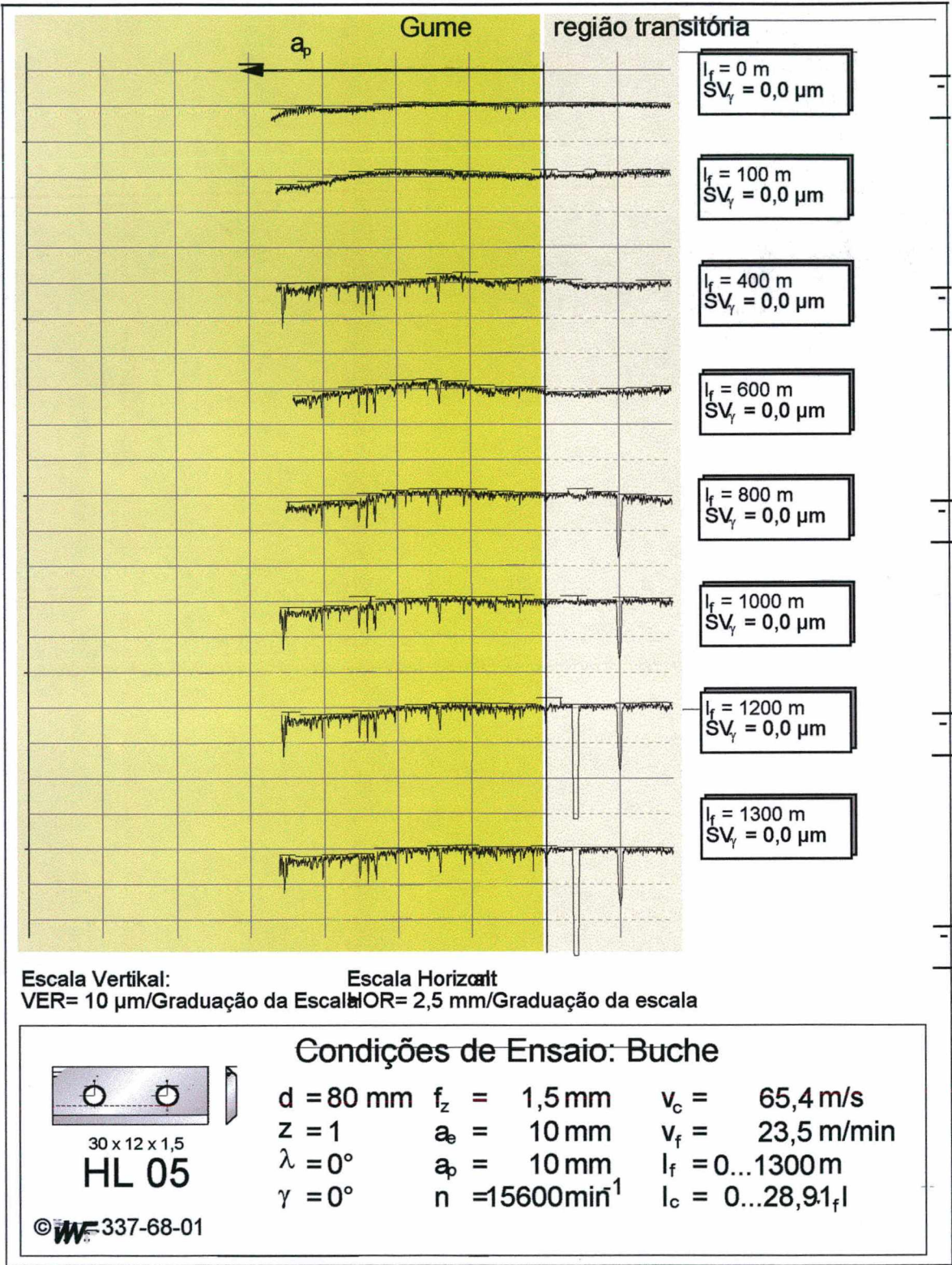


Figura 40 – Processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para a espécie Rotbuche.

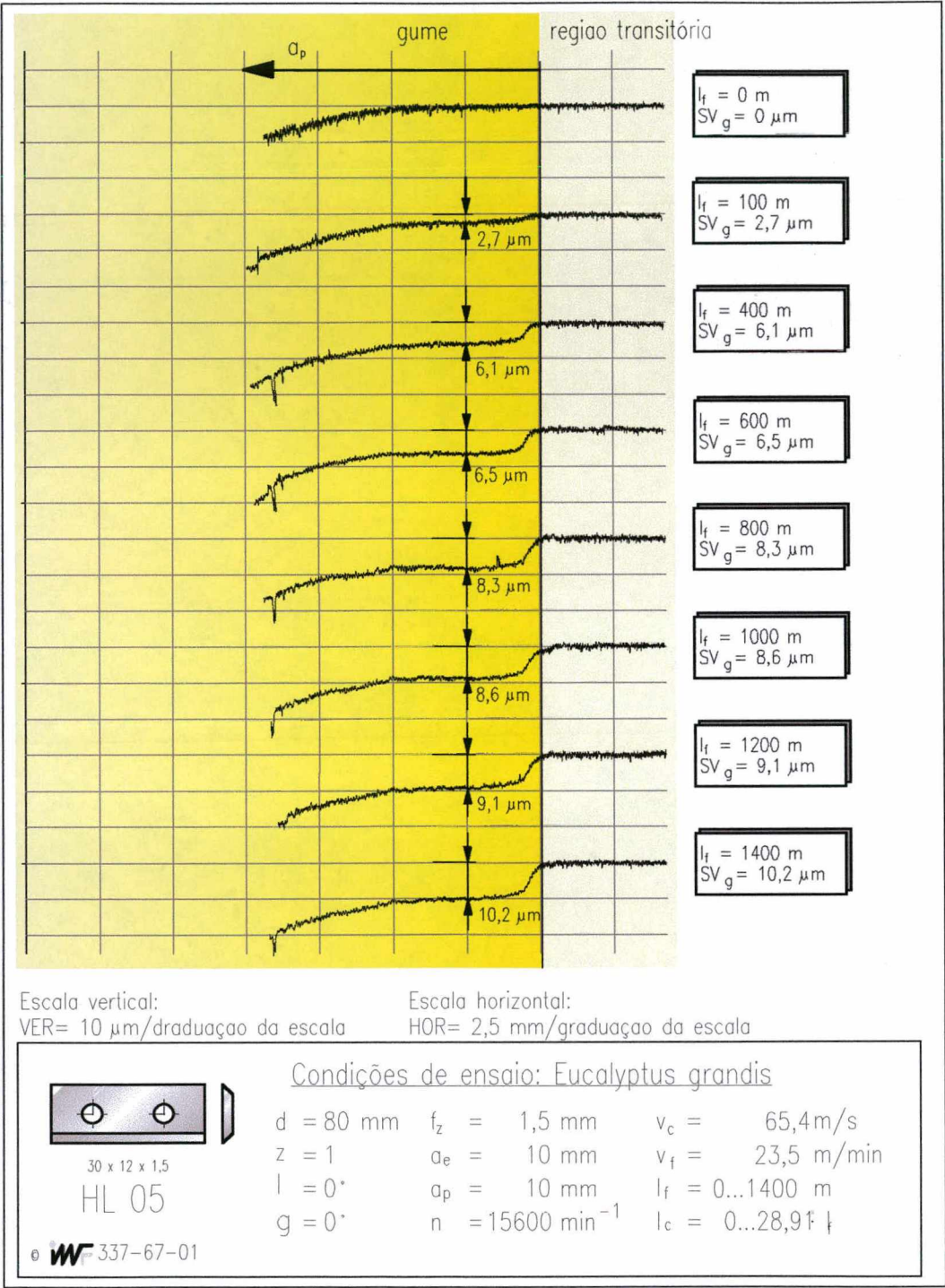


Figura 41 – Processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para a espécie *Eucalyptus grandis*.

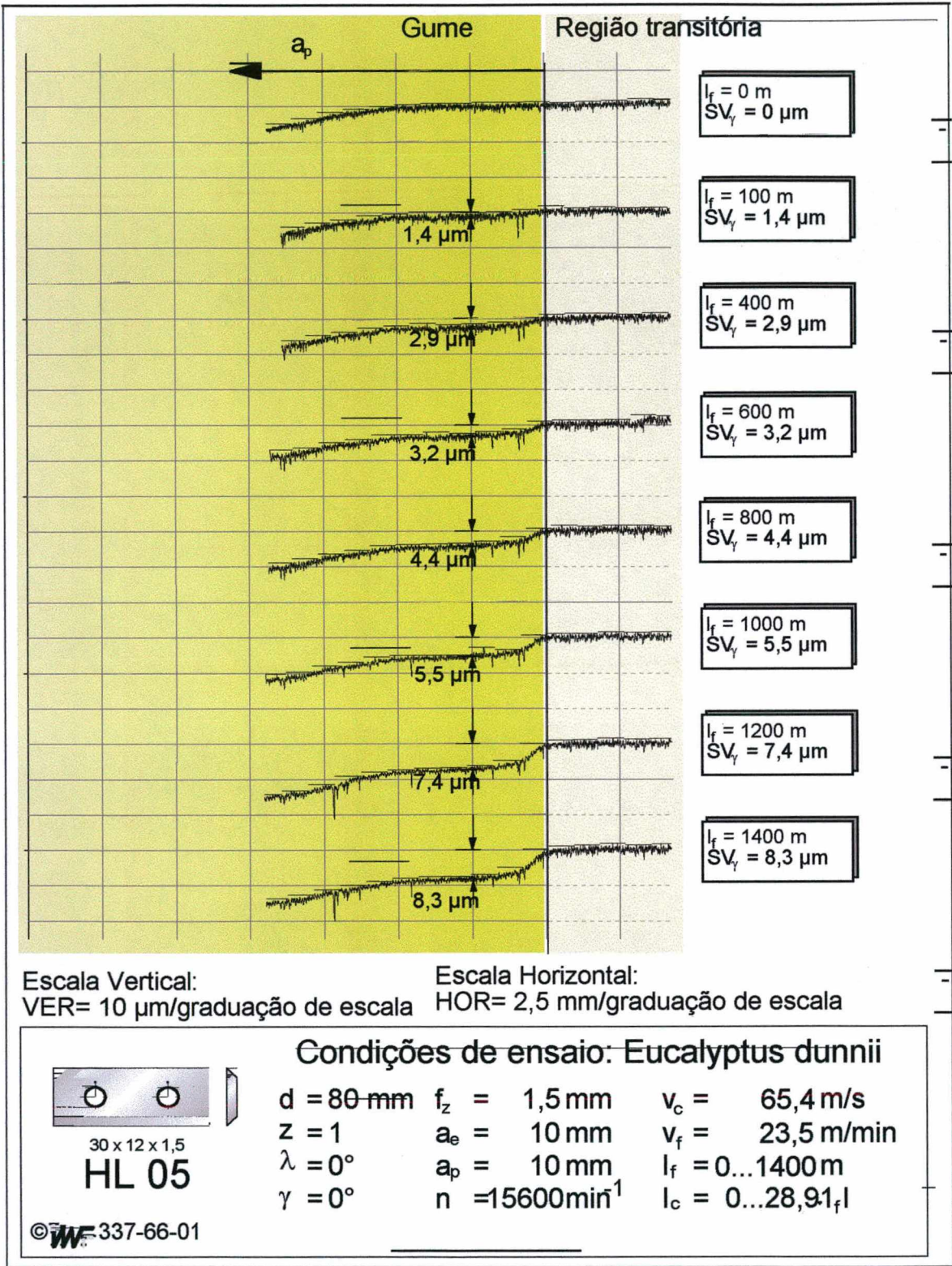


Figura 42 – Processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para a espécie *Eucalyptus dunnii*.

Para a comparação dos resultados de medição, tanto o desgaste do gume da ferramenta, como os valores de rugosidade medidos mostram-se, que a danificação do gume da ferramenta de metal duro não provoca nenhuma deformação na superfície do corpo de prova usinado.

Nas pesquisas realizadas para as três diferentes espécies de madeira observou-se uma estreita relação linear entre a progressão do desgaste e a força de corte, como é mostrado na **Figura 43**. As forças de corte F_c tem um aumento suave em dependência do deslocamento do gume em relação a face $S_v\gamma$. Para a profundidade de corte adotada percebe-se uma dependência relativamente pequena do desgaste da ferramenta para a espécie *Rotbuche*.

Observa-se que o comportamento das forças na usinagem com ferramentas de metal duro é dependente do tipo de desgaste que ocorre na ferramenta. Principalmente formas de desgaste que levam a um arredondamento do gume causam um aumento mais suave nas forças de corte, verificado neste trabalho para as espécies de *E. grandis* e *E. dunnii* (**Figura 43**).

O critério de fim de vida adotado neste trabalho foi determinado com base na avaliação da qualidade superficial alcançada, considerado o fator mais importante para a indústria de transformação da madeira em produto final.

A construção anatômica da madeira como sua estrutura, possuem grande influência sobre o acabamento superficial na usinagem com ferramentas de geometria definida. A deformação da camada superficial do corpo de prova de madeira em dependência do percurso de avanço l_f foi investigado por Fischer [1993]. Grandezas sobre o desgaste não foram declarados

Duas pesquisas com as espécies *Fichte* (Abeto – pinheiro) e *Rotbuche* (faia rubra) de diferentes famílias foram realizadas por Schadoffsky [1996] no chão de fábrica para o processo de fresamento conjugado. O gume da ferramenta de gume único ($Z = 1$) era de metal duro. Os resultados mostraram para a espécie “*Fichte*”, que para um percurso de avanço de $l_f = 2000$ m foram verificados valores médios do deslocamento do gume em relação ao gume $S_v\gamma$ de aproximadamente 15 a 20 μm . Entretanto, a deformação das células no âmbito da primeira camada são relativamente pequenas. De uma até no máximo três camadas de células estava deformada permanente. A pequena deformação das células pode ser explicada através da influência do material do gume da ferramenta. A avaliação dos ensaios de vida para *Fagus Sylvatica* (Rotbuche) mostrou neste caso uma deformação menor das células, embora o desgaste do gume da ferramenta já para um percurso de avanço de $l_f = 1000$ m fosse um pouco mais alto, aproximadamente $S_v\gamma = (20 \text{ a } 25) \mu\text{m}$.

A menor deformação das células para *Rotbuche* é justificada pela comparativa maior densidade.

Heisel [1991] deformou elasticamente a parte de madeira primaveril com a cunha da ferramenta para a superfície livre e é então profundamente mais deformado do que as áreas de madeira de outono. A ondulação resultante tinha uma profundidade de 25 μm para “*Fichte*” e é nesse caso possível de ser reconhecido com o auxílio de um sensor mecânico de medição.

Neste trabalho, foram realizadas fotos com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura para mostrar a deformação das células da primeira camada para *Rotbuche*, *E. dunnii* e *E. grandis*. Verificou-se que não houve nenhuma influência tanto do percurso de avanço como da variação do avanço sobre a profundidade de deformação das células (**Figura 44**, **Figura 4**, **Figura 4**).

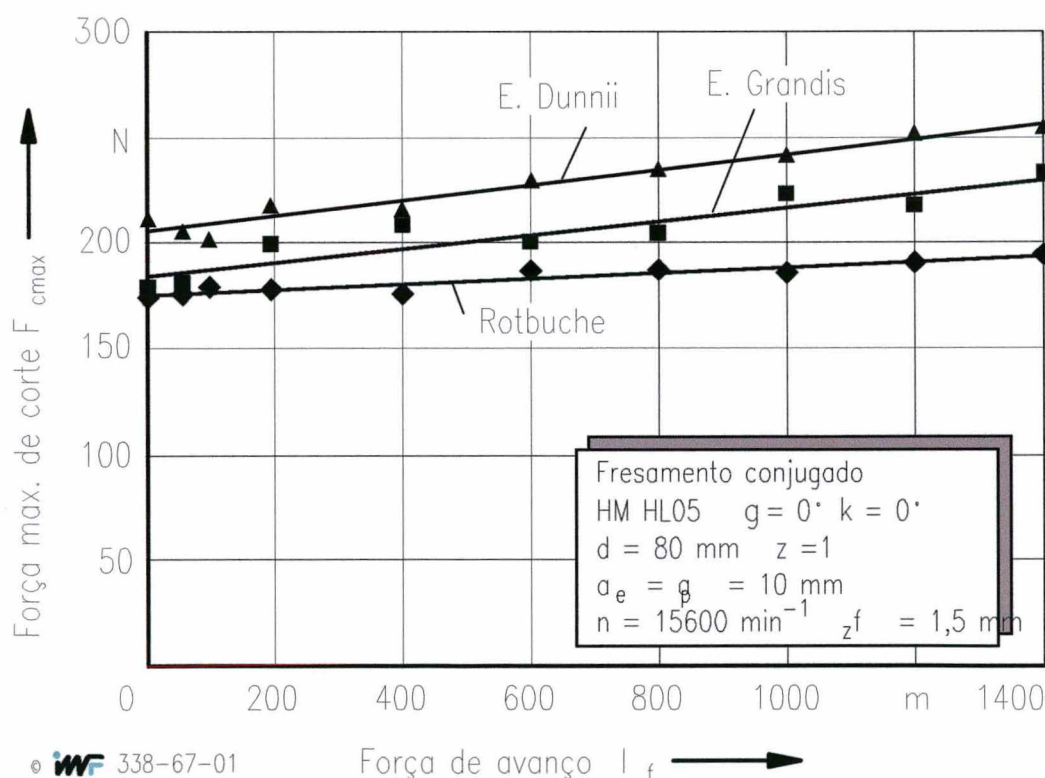
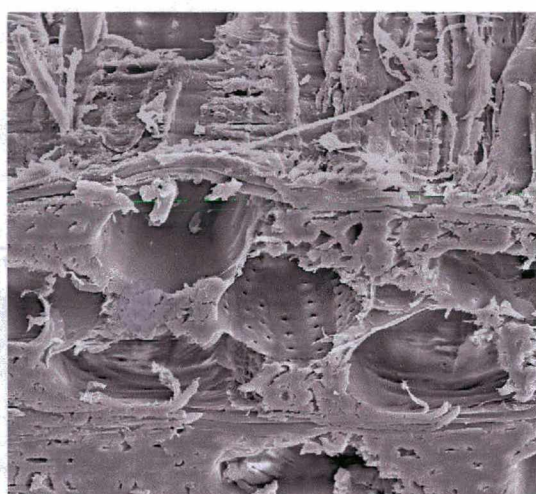
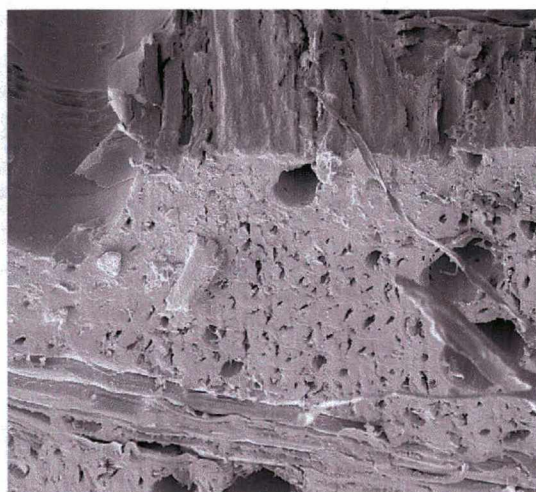


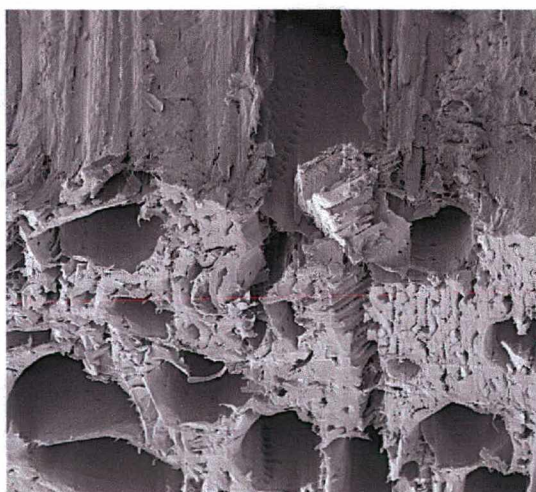
Figura 43 – Força de corte máxima em correlação com o percurso de corte no processo de desgaste da ferramenta no fresamento conjugado para as espécies *Rotbuche*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.



Rotbuche
Ampliação: 350 X
 $l_f = 6 \text{ m}$
 $f_z = 1,5 \text{ mm}$



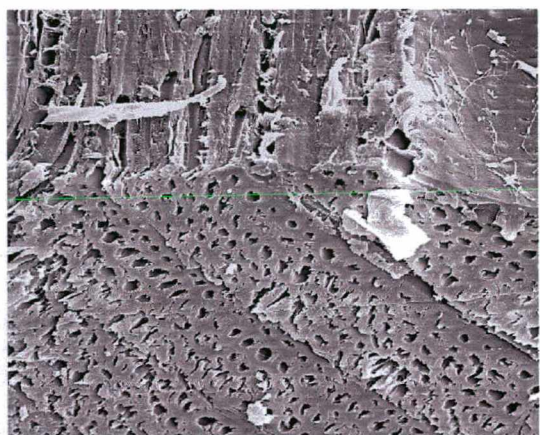
Rotbuche
Ampliação: 350 X
 $l_f = 800 \text{ m}$
 $f_z = 1,5 \text{ mm}$



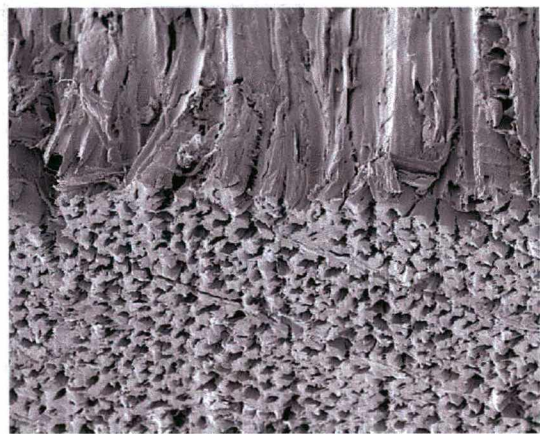
Rotbuche
Ampliação: 350 X
 $l_f = 1400 \text{ m}$
 $f_z = 1,5 \text{ mm}$

© WFC 339-69-01

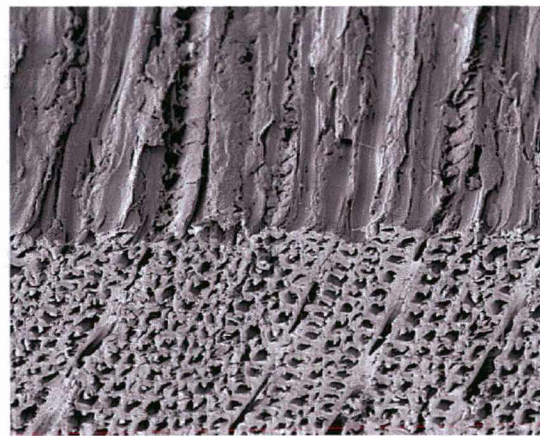
Figura 44 – Ensaio de desgaste da ferramenta na usinagem *Rotbuche* na direção tangencial longitudinal, microscopia eletrônica com ampliação de 350x.



E. dunnii
Ampliação: 350 X
 $l_f = 6 \text{ m}$
 $f_z = 1,5 \text{ mm}$



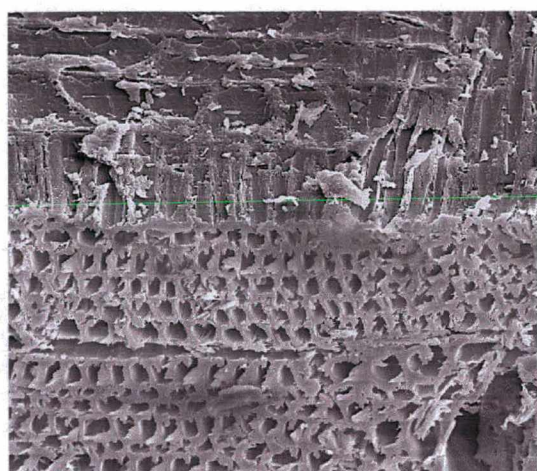
E. dunnii
Ampliação: 350 X
 $l_f = 800 \text{ m}$
 $f_z = 1,5 \text{ mm}$



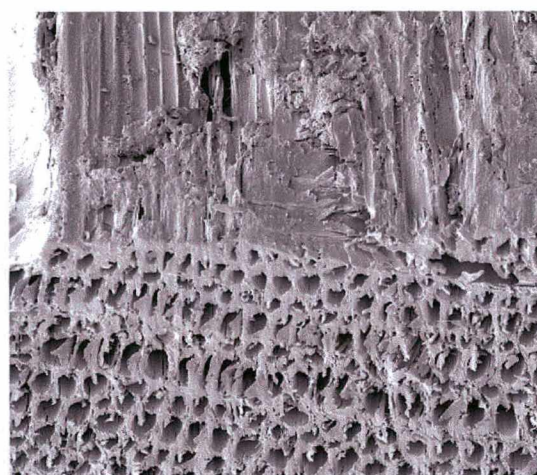
E. dunnii
Ampliação: 350 X
 $l_f = 1400 \text{ m}$
 $f_z = 1,5 \text{ mm}$

© WM 339-68-01

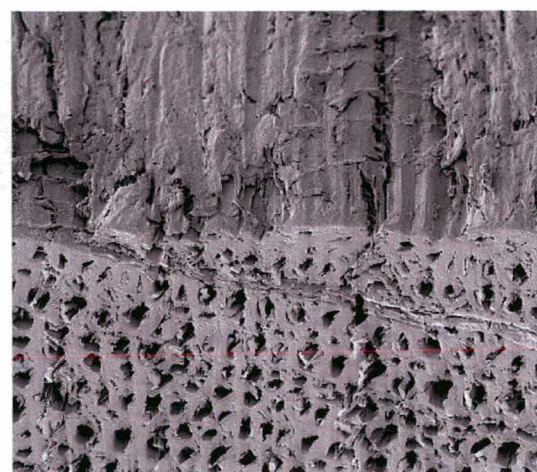
Figura 45 – Ensaio de desgaste da ferramenta na usinagem *Eucalyptus dunnii* na direção tangencial longitudinal, microscopia eletrônica com ampliação de 350x.

**E. grandis**

Ampliação: 350 X

 $l_f = 6 \text{ m}$ $f_z = 1,5 \text{ mm}$ **E. grandis**

Ampliação: 350 X

 $l_f = 800 \text{ m}$ $f_z = 1,5 \text{ mm}$ **E. grandis**

Ampliação: 350 X

 $l_f = 1400 \text{ m}$ $f_z = 1,5 \text{ mm}$

© WF 339-67-01

Figura 46 – Ensaio de desgaste da ferramenta na usinagem *Eucalyptus grandis* na direção tangencial longitudinal, microscopia eletrônica com ampliação de 350x.

Consequentemente, a rugosidade foi também medida, com a finalidade de melhor avaliar o processo.

R_{pk} (Figura 4) é o parâmetro mais indicado para esta avaliação, pois apresenta somente os picos dos valores de rugosidade medidos, que estão relacionados com o levantamento das fibras. A estrutura natural da madeira permanece intocável.

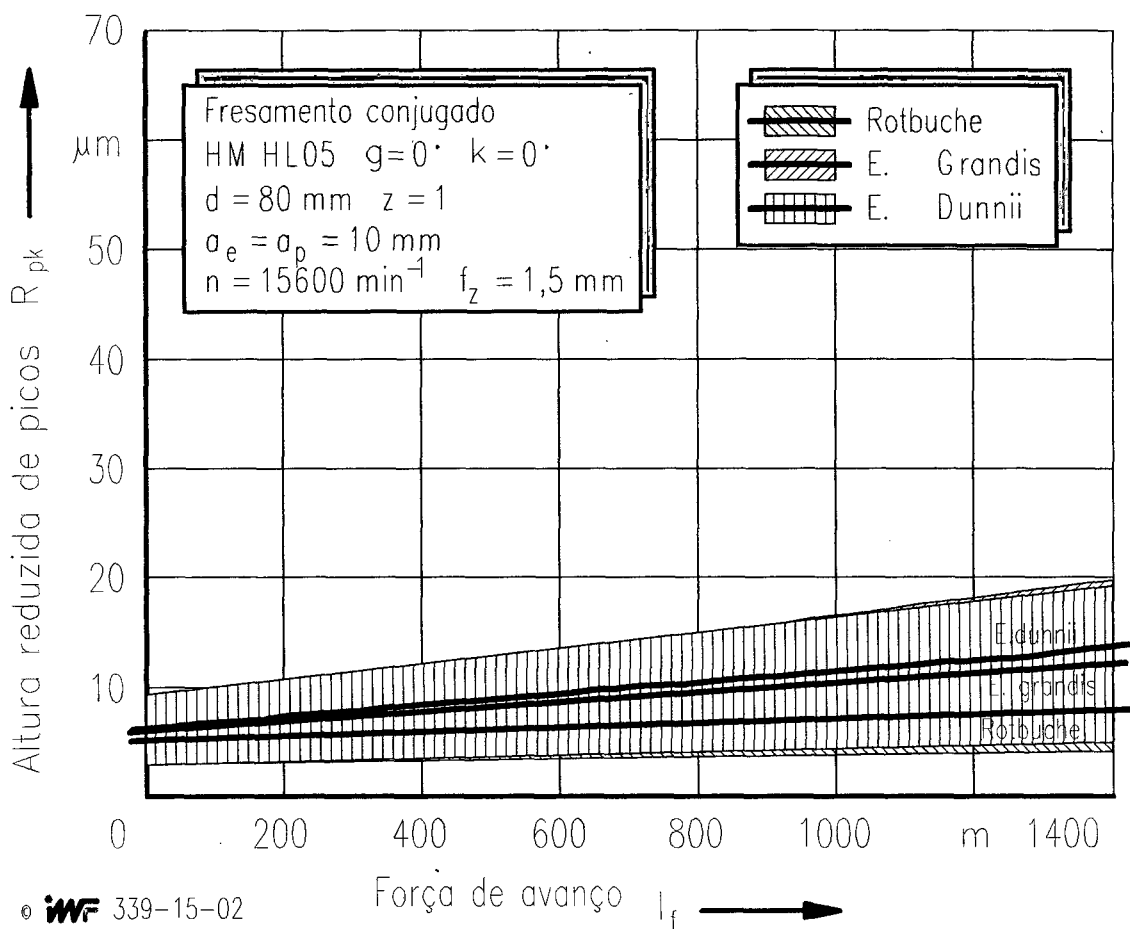


Figura 47 – Análise da textura superficial correlacionada ao percurso de corte no processo de fresamento conjugado das espécies de *Rotbuche*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1. CONCLUSÕES

O emprego industrial de madeiras de floresta plantada como, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* é, atualmente, cada vez mais determinado pelas pressões ambientais por parte dos organismos internacionais prevendo a partir do ano 2005 a proibição da comercialização de madeiras oriundas de florestas tropicais e subtropicais. Além disso, a necessidade da redução de custos e a manutenção da competitividade são fatores decisivos.

O futuro dos programas do setor florestal brasileiro irá depender de financiamentos e novos incentivos, da evolução do uso múltiplo da madeira (através das análises das características de usinabilidade), dos avanços na legislação ambiental e dos sistemas de certificação, do fomento florestal¹, da modernização do parque industrial, da otimização do processo produtivo garantindo a elevação na qualidade final do produto, da necessidade de um “Design” próprio, da redução dos custos na cadeia produtiva, da “desverticalização” do setor, bem como da reavaliação dos fatores sistêmicos², que colaboram para que o setor não seja competitivo no mercado internacional.

As instituições de pesquisa/Universidades e as entidades/empresas florestais devem estabelecer as estratégias corretas para atender todos os segmentos e enfrentar os novos desafios de um mercado globalizado.

¹ O fomento florestal deve procurar estender ao pequeno produtor benefícios do setor como um todo e não concentrando-o em grupos setorizados com maior poder econômico e político

² Os fatores sistêmicos envolvem a reforma tributária, a redução dos custos dos fretes rodoviários e portuários - a participação dos fretes no custo final dos móveis é muito elevada -, bem como a modernização dos portos.

Um dos grandes desafios é o nível de tecnologia da indústria moveleira nacional, que é considerado nível médio. Num total de 13500 empresas, 10000 são micro-empresas. A criação de consórcios empresariais orientados para promover a modernização tecnológica eficaz é indiscutível para restringir a oferta de móveis de baixa qualidade provenientes do setor informal da economia, que desvalorizam o produto no mercado internacional.

O estabelecimento de normas técnicas, a exemplo da Alemanha, a adoção de um programa ostensivo de Design para a produção de móveis e pesquisas para se conhecer os fenômenos nos processos de usinagem e, consequentemente, na otimização dos parâmetros de usinagem para as novas alternativas de matéria-prima no mercado são de máxima importância para a elevação do nível de qualidade dos produtos de madeira e, portanto, de sua competitividade.

A tendência, se observadas as metas governamentais, é de crescimento do comércio internacional do setor, com perspectivas boas de novos mercados, não somente para produtos acabados como também, em larga escala, para partes, peças, componentes e produtos semi-elaborados.

Muitos dos atuais problemas industriais serão resolvidos através do emprego de novas tecnologias, já que com isto tem-se a possibilidade de fabricação dos elementos de móveis com melhor precisão e com geometria complexa imposta pelos Designer, e, ao mesmo tempo, com possível redução nos custos de fabricação e com maior segurança na produção.

Outro fator preponderante para a concretização de novas oportunidades de negócio a nível de mercado mundial é o reconhecimento pelos centros de excelência em tecnologia de usinagem da madeira das excelentes características de usinabilidade destes novos tipos de madeiras, denominados por eles de “alternativas”. Daí a importância em desenvolver ensaios de usinabilidade empregando novas tecnologias na área de processos de usinagem comparando diretamente as madeiras de Eucalipto - madeiras alternativas brasileiras (substitutas naturais para as madeiras nativas oriundas de florestas tropicais e subtropicais) - com um tipo de madeira empregada para fins nobres de um país de elevada importância comercial como, por exemplo, a Alemanha.

Dentre as novas tecnologias, que contribuem de forma eficaz é a utilização de elevadas velocidades de corte no processo de usinagem de madeiras, já que é uma opção viável para a

produção de superfícies de alta qualidade sem que haja necessidade de uma etapa posterior de acabamento. Esta tecnologia, caracterizada pelo aumento da produtividade com manutenção do acabamento superficial exigido pelo setor moveleiro, tem garantido um lugar de destaque na tecnologia de fabricação do futuro.

A indústria de madeiras, principalmente a indústria moveleira brasileira, necessita de, ainda mais, dados tecnológicos sobre a usinagem de madeiras alternativas „*Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*“ - madeiras com importância crescente na fabricação de móveis para a exportação.

A caracterização tecnológica, principalmente ensaios de usinabilidade, realizada em centros de excelência em Tecnologia de Usinagem de Madeiras permite tanto o aumento da credibilidade pelo mercado internacional das alternativas propostas pelo setor florestal brasileiro, bem como para o setor moveleiro poder trabalhar em condições econômicas e de qualidade assegurada que devem permitir uma melhoria do processo produtivo, bem como o desenvolvimento de novas máquinas-ferramentas e ferramentas.

A realização de investigações científicas na usinagem de madeiras alternativas empregando materiais de ferramentas de metal duro, mais utilizados pelo setor moveleiro, empregando elevada velocidade de corte devem buscar uma diminuição do esmagamento das fibras com conseqüente melhoria da qualidade superficial para o corte longitudinal das fibras.

Este trabalho tem como objetivo fornecer dados comparativos das características de usinabilidade de madeiras alternativas para a indústria moveleira Brasil, bem como da Alemanha. Os dados obtidos neste estudo serão transferidos para a indústria fabricante de máquinas ferramentas, bem como para os usuários destas, além de contribuir para o aumento da utilização destas espécies pelo setor moveleiro.

A madeira independentemente da espécie constitui-se preponderantemente do material da sua composição, ou seja, lignina, celulose, bem como uma pequena quantidade de componentes adicionais, e através da densidade de uma amostra de madeira pode-se correlacionar proporcionalmente a relação das membranas e dos poros. Também as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, tenacidade, resistência a tração, a compressão e a flexão, por exemplo) e as forças de usinagem são fortemente influenciados, em regra, pela densidade da madeira. Consequentemente, neste trabalho, foi determinada a densidade e a correspondente dureza.

Para a análise da influência da umidade sobre as forças de corte foi realizada investigação com a espécie *E. dunnii*. A dependência investigada mostra, que as forças permanecem constantes tanto na faixa de umidade de até cerca de 20% como também acima de cerca de 40%. Já na faixa de 20% a 40% de umidade ocorre um leve aumento das forças de corte em até 10%. Desta forma, conclui-se que pode-se fazer uma análise comparativa direta das forças de corte para os três tipos de madeiras, pois foram usinadas com teor de umidade padrão de 12%.

Com o aumento do avanço pode ser verificado para todas as madeiras analisadas uma dependência linear (levemente degressiva) no aumento das forças de avanço. O Aumento das forças de avanço são mais acentuadas para o *E. dunnii* do que para o *E. grandis* e *Rotbuche*. Para o *Rotbuche* verificou-se menores forças de avanço apesar de apresentar maior densidade, que pode ser esclarecido pelas relativas fases curtas de sua estrutura anatômica e com isso menores forças internas de ligação.

Através das forças de corte investigadas foram determinadas os valores principais para força de corte segundo Kienzle ($k_{c1.1}$). Com $k_{c1.1}=19,66$ N/mm está o *E. dunnii* claramente acima do *E. grandis* ($k_{c1.1}=16,93$ N/mm) e *Rotbuche* ($k_{c1.1}=16,15$ N/mm). Isto já era esperado de acordo com os resultados obtidos para as forças de avanço.

A influência do avanço sobre a rugosidade da ranhura fresada das madeiras mostra que até aproximadamente $f_z=1,5$ mm não ocorre nenhuma variação dos valores R_z e R_{pk} . Somente para $f_z=2$ mm aumentam visivelmente os valores de rugosidade, o que gera uma correspondente piora da qualidade superficial. Pode-se ainda observar que para a madeira de *E. grandis*, os valores de rugosidade para a faixa de $f_z=2$ apresentam valores excelentes. Isto devido ao maior número de poros presentes na estrutura anatômica quando comparado com as outras duas madeiras. Implica em vantagem econômica em se fresar a madeira de *E. grandis* com maiores velocidades de avanço.

Para que um processo de fabricação possa ser considerado amadurecido e seja passível de implementação é recomendável uma análise da viabilidade econômica do mesmo. Para isto fazem-se necessários ensaios de vida da ferramenta, embora no caso de usinagem de madeiras maciças com ferramenta de metal duro não tenham apresentado altas taxas de desgaste da ferramenta. Os ensaios de vida útil realizados para um percurso de corte de 40 km (29 x percurso de avanço) produziram uma piora mínima da qualidade superficial e um aumento muito pequeno das forças de corte. Isto é esclarecido com o também pequeno desgaste do gume da ferramenta:

o deslocamento do gume S_{vy} final determinado para o *E. dunnii* foi de 8,5 μm e para o *E. grandis* de 10 μm . Para o *Rotbuche* nenhum deslocamento do gume foi identificado pela agulha do apalpador, somente a análise microscópica da impressão do gume da ferramenta mostra um leve arredondamento do gume. Disso confirma-se, que o gume após 40 km de percurso de corte se encontra ainda afiado. Os valores de desgaste um pouco maiores para a madeira de eucalipto em comparação com a madeira mais dura de *Rotbuche* se justifica pela presença de percentuais mais elevados de silicato no eucalipto.

Conclui-se que o desenvolvimento de pesquisas tecnológicas como a análise comparativa da usinabilidade de madeiras de *Fagus sylvatica*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* realizadas em centros de excelência a nível mundial associadas a projetos de campo realizadas por profissionais altamente qualificados e capacitados permite a divulgação de resultados altamente positivos para a madeira brasileira de eucalipto no mercado internacional.

Associadas as pesquisas florestais, o domínio da utilização de novas tecnologias, as atividades de educação ambiental, ainda assim as ações no campo político são necessárias, pois permitem que a idéia da utilização de madeiras de floresta plantada seja realmente vista e aceita como alternativa sócio-econômico e ambiental para ser adotada pelo maior número possível de produtores florestais, empresas do setor moveleiro e órgãos do governo.

Isto possibilita ainda incentivar a reconversão de atividades florestais adequando-as aos tempos de economia globalizada, viabilizando tanto o uso do solo conforme sua aptidão agrícola quanto à necessidade de geração de renda e de novas oportunidades de trabalho para o pequeno e médio produtor rural. Solução importante para a manutenção deste no seu hábitat, minimizando assim os problemas advindo do êxodo rural nas grandes cidades.

As novas oportunidades, segundo as tendências internacionais, estão decididamente relacionadas a obtenção de florestas para fins nobres (indústria moveleira, artigos de madeira e de laminados), onde se atinge a maior agregação de valor possível no setor florestal.

Consolidam-se assim os Programas de floresta plantada de alto valor tecnológico desenvolvidos principalmente na região sul do Brasil e que preparam o Brasil para o terceiro milênio na área florestal (madeireira e moveleira) atingindo, assim, uma das grandes metas do governo brasileiro, o Superávit da Balança Comercial.

6.2. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DA PESQUISA NA ÁREA DE TECNOLOGIA DE USINAGEM DE MADEIRAS ALTERNATIVAS

A caracterização tecnológica de madeiras oriundas de floresta plantada de áreas subtropicais como as do sul do Brasil representa um grande avanço para o setor moveleiro e de artigos de madeira, principalmente pertinente aos estudos da topografia superficial. Entretanto, a continuidade de pesquisas nesse campo são fundamentais para promover ainda mais o desenvolvimento do setor florestal brasileiro, discutindo os aspectos ambientais a nível internacional e os fatores sistêmicos a nível nacional.

O conhecimento dos fenômenos que ocorrem nos processos de usinagem de madeiras de Eucalipto e da caracterização tecnológica destas espécies, permitirão a produção otimizada de elementos de madeira empregando tecnologias modernas, bem como fornecer tanto para o mercado internacional quanto para o Brasil informações fundamentais para a transformação das madeiras alternativas brasileiras - *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* – em artigos de madeira ou móveis, produtos de alto valor agregado.

A investigação sistemática de madeiras „alternativas“ empregando novas tecnologias permite, então, uma conexão rápida e simultânea entre o meio científico, industrial e comercial e, ainda, acelerar o desenvolvimento e otimização de importantes etapas do processo produtivo no setor florestal e moveleiro. Assim, novas forças produtivas podem ser desencadeadas numa escala sem precedentes, onde a competitividade e qualidade são exigências fundamentais.

A. Infra-estrutura para tornar a área florestal/moveleira competitiva no mercado internacional

1. Criação de um núcleo de excelência multidisciplinar em tecnologia de usinagem de madeiras.
2. Projeto de apoio a micro-empresas e empresas na gestão de produtos florestais de alto valor agregado:

2.1 Modernização das empresas com equipamento adequado a produção de móveis de madeira de floresta plantada;

2.2 apoio ao desenvolvimento de máquinas ferramentas nacionais para a fabricação de móveis; e,

2.3 Treinamento nas áreas de aquisição de matéria-prima (madeiras de florestas certificadas por órgãos internacionais – exigência do mercado externo), em Marketing, em negociações estratégicas com clientes internacionais e outros.

B. Pesquisa tecnológica aplicada à área florestal/moveleira visando conhecimento científicos e tecnológicos na área de qualidade e produtividade

1. Otimização dos processos de fabricação para a usinagem de madeiras e de seus derivados

1.1 Otimização do processo de serramento de toras para garantir a oferta e formas adequadas as necessidades do segmento moveleiro, reduzindo as perdas em operações industriais e como resíduos;

1.2 Otimização do processo de serramento (serras fitas) em marcenarias, que constituem 90% das empresas do setor moveleiro; e,

1.3 Otimização do processo de fresamento em altas velocidades para madeiras alternativas garantindo a melhoria do acabamento superficial reduzindo operações subsequentes com redução da utilização do consumo de massas, tintas e similares.

2. Determinação otimizada das grandezas de entrada do processo e da máquina

3. Seleção otimizada de sistemas de ferramentas e materiais da ferramenta

4. Análise econômica dos processos alternativos

5. Determinação objetiva e valoração da qualidade superficial da peças de madeira

6. Caracterização da usinabilidade de derivados de madeira de eucalipto (Compensados, painéis colados, chapas aglomeradas e de MDF);

7. Investigação das curvas de vida de diferentes materiais da ferramenta para diferentes processos de usinagem.

8. Alternativas para o emprego dos resíduos de madeira das serrarias e da indústria moveleira e da construção civil.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- _____. **Holzindustrie und Holzgewerkschaften in Europa mit gemeinsamer Initiative für den Tropenwald.** In.: Holz Zentralblatt 148, Nr. 5, p. 2270, Dezember, 1997.
- _____. **Bancos Disponibilizam Financiamentos para a Área do Meio Ambiente.** IN.: Revista do meio ambiente industrial. P. 92- 101. 1999.
- _____. **ISO 14000: Um Importante Instrumento de Competitividade Internacional .** Boletim ABNT, Rio de Janeiro, Jan. 1996.
- _____. **Brasil Participa da ISO Série 14000.** In.: Gestão Ambiental: Compromisso com a Empresa. P. 5 . 1996.
2. **CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1992. Agenda 21.** Brasília: Senado Federal, Subsecretária de Edições Técnicas, 1996.
- AKIHIKO, N.; Fujita, S. **Developments of a cutting tool failure detector.** Bukk. Jpn. Soc. Prec. Eng., n. 23, p. 134-139. 1989.
- ARNOLD, W. **Beitrag zu Entwincklung und Einsatz aktiv magnetgelagert Hochgeschwindigkeitsfrässpindeln.** Dissertation TH Darmstadt, 1984.
- ARRUDA, H. A. C. **Influência da Classificação das Lâminas em Vigas de Madeira Laminada-Colada.** Dissertação de Mestrado do curso de pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC. 1995
- BAGARD, P. **Fresamento a altas velocidades de ferramental de conformação: mais Qualidade e precisão.** In.: Revista Máquinas e Metais. P. 78-89. Setembro 1995.

- BARZ, E., BREIER, H. **Kurzverfahren zur Prüfung der Verschleißwirkung und der Zerspanbarkeit von Holz und Holzwerkstoffen**. Holz als Roh- und Werkstoff 29 (4): S 142-149, 1971.
- BEYER, P.-H. **Steuerung und Antriebe für Leistungsfähige Holzbearbeitungsmaschinen**. 9. Holztechnisches Kolloquium, Braunschweig, 25. U. 26. Mai, 1994.
- BEYER, P.-H. **Technologie von CNC-Holzbearbeitungsmaschinen**. Cornelsen Giradet, Düsseldorf. 1991.
- BODIG, J.; Jayne, B. **Mechanics of Wood and Composites**. USA. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 712 p. 1982.
- BOEHS, L. **Materiais para Ferramentas: As novas gerações e suas aplicações**. In. : IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, p. 1039-1042. Florianópolis, 1987.
- BOHN, A.R. **Influência da Espessura das Lâminas e da Cola na Madeira Laminada-Colada**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 68 p. 1995
- BONAC, T. **Microbivel for cemented tungsten carbide wood cutting tools**; Holz als Roh- und Werkstoff, 40: 411-413, 1982.
- BORATYNSKI, M. ; ZAKRESKI, W. **Welligkeitskennwerte beim Wälzfräsen im Gleich- und Gegenlauf**. Holytechnologie 30 (1990).
- BURGER, M. L.; RICHTER, H.-G. **Anatomia da Madeira**. Editora Nobel. São Paulo. 154 p. 1991.
- CALORI, J.V.; Kikuti, P. **Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de *Eucalyptus Dunnii* aos 20 anos de idade**. IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalyptus. V. 3. P. 321-326. Salvador, Bahia. 1997.
- CARRERE, R.; LOHMANN, L. **Pulping the South: Industrial Tree Plantations and the World Paper Economy**. London [u.a.]: Zed, 280 S. 1996

-
- CHARDIN, A. **Saw Tooth Performance: Variables Affecting Tooth Wear**. In: Proceedings of the Wood Machining Seminar, Richmond, California, Forest Products Laboratory, University of California, p. 1-14, 1971.
- COSTA, E.M. **A Madeira de Eucalipto na Indústria moveleira**. V Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. P. 75-89. 1996.
- COUTINHO, Luciano; FERRAZ, J. C. (coord.). **Estudo da Competitividade da Indústria Brasileira**. Papirus, 2ª ed., Campinas, 1994. 510p.
- DATE: Departamento de Apoio e Desenvolvimento Técnico. **Biodeterioração e Preservação de Madeiras**. Montana Química S.A. 74 p. São Paulo. 1991.
- DE PAULA LIMA, Walter. **Impacto ambiental do Eucalipto**. Ed. Edusp, 2º ed., 1996.
- Deutsches Landwirtschaftsministerium. 5. Bericht über Tropenholz. 1997.
- DIN4768. **Ermittlung der Rauheitsmeßgrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten**. 1974.
- DIN4776. **Kenngößen R_k , R_{vk} , e R_{pk} , M_{r1} , M_{r2} zur Beschreibung des Materialtraganteils im Rauheitsprofil, Meßbedingungen und Auswerteverfahren**. 1990.
- DINIZ, A. E. ; CUPINI, N. L. **The Surface roughness in turning process: criterion of tool life and its relationship with tool wear**. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas. Rio de Janeiro, v. XIV, n. 1, 41-56. 1992.
- DONNELLY; R.; SUCHEK, V. **Oportunidades de Expansão do Setor Madeireiro**. In Revista da Madeira, Curitiba: ABPM, V. 6, p. 4-6. 1996.
- DRÜCKHAMMER, J. **Rechnergestützte Optimierung des Zerpanprozesses beim Fräsen von Spanplatten**. Dissertation TU Braunschweig, 1988.
- Elisabeth Ann's 100:1 Favourite. **Diamonds in Industry: Woodworking with Syndate**. P.19-21. Reino Unido.
- ETTELT, B. **Sägen, Fräsen, Bohren - Die Spannung von Holz und ihre Werkzeuge**. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1987.

Fa. Uddeholm Strip Steel AB: **Holzbandsägeblatt-Handbuch**, Firmenbroschür, 1997.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 1. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FERREIRA, A. C. **Apostila de Comando Numérico**. GRUCON/EMC/UFSC. 1995.

FERREIRA, M.; SANTOS, P.E.T. dos. **Melhoramento genético florestal dos Eucalyptus no Brasil – Breve Histórico e Perspectivas**. In: IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalypts. Salvador: August, 1997. P. 14-34.

FETEP. Concurso Nacional de Design para Móveis de Eucalipto. 2000.

FISCHER, R. **Alternative Verfahren und Werkzeuge zur Holzbearbeitung**. 10. Holztechnisches Kolloquium, Braunschweig; Vulkan Verlag, 1997.

FISCHER, R. **Beitrag zur Modellierung der Abstumpfung von Holzbearbeitungswerkzeugen**. Holztechnologie 22, S 70-72, 1983.

FISCHER, R. **Praxisgerechte Oberflächenbewertung als Beitrag für die Qualitätsicherung**. 9. Holztechnisches Kolloquium, Braunschweig. 1994.

FISCHER, R.. **Die rechnergestützte Simulation von Vorgängen der mechanischen Bearbeitung von Holzwerkstoffen**, Teil 1: Konzept für ein physikalisch determiniertes Modell, Holztechnologie. 30, 2: S 89-92, 1989; Teil 2: Erste Erfassung eines Rechnerprogramms zum maschinenlosen Experimentieren an der Wirkpaarung Schneide Werkstoff, Holztechnologie 30, 6: S 281-282, 1989.

FISCHER, R.. **Orientierende Versuche beim Schneiden von Holz**; Holztechnologie 20, 2: S 111-115, 1979.

FLÂNDOLI SOBRINHO, V. **Lumber Market in Brazil**. Wood Magazine 32: S 15-16.

FUSCO, P. B. **Os Caminhos da Evolução da Engenharia da Madeira**. Encontro Brasileiro de Madeira e Estruturas de Madeira. V. 6. P. 7-18. São Carlos. 1989.

FUß, M. **Fraesen von Holz und Holzwerkstoffen Verbesserung und Zerpannleistung und Wirtschaftlichkeit**. Dissertation TU-Braunschweig. 1995

-
- FUB, M. **Fräsen und Bohren - Arbeiten im Grenzbereich von Qualität und Leistung.** Vortrag auf dem 9. Holztechnischen Kolloquim, Braunschweig, 1994.
- FUB, M. **Grundlagen der Hochgeschwindigkeitszerspanung.** Vortrag auf der Fachtagung Hochleistungszerspanung - Hochgeschwindigkeitsfräsen von Holz und Holzwerkstoffen, Bielefeld, 3.12.1992.
- FUB, M. **Wirkusammenhänge beim Hochgeschwindigkeitsfraesen.** HOB – Die Holzbearbeitung 11, S. 66-71. 1996.
- GERLOFF, H. **Beitrag zum Einsatz von Reaktionsharzbeton in Werkzeugmaschinen.** Dissertation TU Braunschweig, 1989.
- Giosa, L. **O Brasil Profissional: A Hora e a Vez da Competência e Perspectivas da Economia Brasileira".** Palestra proferida durante a entrega do Prêmio ANEFAC98.
- Gonçalves, M.T.T. **Processamento da madeira.** 242 p. UNESP: Bauru,. 2000.
- Gorges Farias, M. **Manutenção do jovem pequeno produtor rural no seu habitat.** In: Projeto Florestal Catarinense da Secretaria estadual de Agricultura e Desenvolvimento Rural. 8 p. 1999.
- GORGES, M. **Monitoramento de Processos de Fabricação.** Dissertação de Mestrado, Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis. 1992
- GORGES-FARIAS, M. **Ecodesign.** Palestra UNIVILLE, 10 p., agosto 2000
- GORGES-FARIAS, M. **Fresamento de madeiras e de seus Derivados.** Qualificação para a Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Curso de pós-graduação em engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 1996.
- GORGES-FARIAS, M. **Monitoramento de Processos de Fabricação.** Dissertação de Mestrado, Curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis. 1992
- GORGES-FARIAS, M. **Vergleichende Untersuchungen der Zerpannungseigenschaften von Rotbuche, Eucalyptus Dunnii und Eucalyptus Grandis.** Abschlußbericht, TU-Braunschweig/DAAD, 1999.

- GORGES-FARIAS, M.. **Fresamento de madeiras e de seus Derivados**. Qualificação para a Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Curso de pós-graduação em engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 1996.
- GOTTLOB, W.J. **Determinação da vida das ferramentas de aço AISI classe D-6 e do Stellite-1 na Usinagem da Madeira de Eucalyptus Grandis**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 185 p. 1996.
- GOTTLOB, W.J. **Os materiais das Ferramentas Usadas na Usinagem de Madeira**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. USP – São Carlos. 116 p. 1991.
- GRANDO, M.C. **Potencial de Mercado Nacional**. III Seminário sobre Processamento e Utilização de Madeiras de Reflorestamento. P. 9-12. Curitiba. 1994
- GRESHAM, G. E. **Mercado de Madeira de Florestas Plantadas**. Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria. P.-147 165. 1997.
- HAYASHI, K.; SUZUKI, T. **Effect of Cutting Speed on Tool Wear in the Peripherak Milling of Wood**. Mokuzai Gakkaishi, vol. 29, 1. P. 36-42. 1983.
- HEISEL, U. ; Krondorfer, H. **Oberflächenqualitaet beim Umfangsplanfraesen**. HOB – Die Holzbearbeitung , 7/8. S. 59-62. 1996.
- HEISEL, U. **Innovative Holzbearbeitungsmaschinen**. 10. Holztechnisches Kolloquium, Braunschweig; Vulkan Verlag, 1997.
- HEISEL, U. **Wege und Lösung zur Konstruktionsoptmierung von Maschinen für die Holzbearbeitung**. 9. Holztechnisches Kolloquium, Braunschweig; Vulkan Verlag, 1995.
- HEISEL, U.; KRONDORFER, H. **Oberflächenqualität beim Umfangsplanfräsen**. HOB 7/8. S. 59-62. 1996.
- HEISEL, U.; TRÖGER, J.; MÜLLNER, R. **Optimierung des Stirnplanfräsverfahrens**. HOB 4, S. 95-99. 1997.
- HIGA, R.C.V et alli. **Comportamento de Procedência de Eucalyptus em Área de Ocorrência de Geadas na Região Sul do Brasil**. In IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalyptus. Salvador, V. 1, p. 106-110. 1997.

-
- HOFFMEISTER, H.-W.; GORGES-FARIAS, M.; SCHNETTKER, T. A. **Entwicklungspotentiale beim Bandsaegen von Formteilen**. HOB – Die Holzbearbeitung. N. 4, S. 86-89, 1998.
- HÖRSEMAN, W. **Hochgeschwindigkeitsschleifen mit aktiv Magnetgelagerten Spindeln**. Dissertation TU Braunschweig. 1992.
- HUG, H. **Präzise HSC-Bearbeitung**. Werkstatt und Betrieb 126 (1193) 9, S. 539-541.
- IBAMA: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis. **PREVFOGO: Sistema Nacional de Prevenção e combate aos Incêndios Florestais**. 8 p. Brasília. 1994.
- INDÚSTRIA de móveis. Porto Alegre ; SERASA, n.41, 1997
- JACOBS, M.R. **Eucalyptus for Planting**. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rom, 1981.
- JAUCH, R.. **Auswirkungen von HSC auf Fräswerkzeuge**. dima v. 6. 1992
- JIANG, Y.; Xu, J.H. **In-process Monitoring of toll wear stage by the frequency band energy method**. Annals CIRP, 36, p. 45-48. 1987.
- JOSTMEIER, H. **Untersuchungen beim Fräsen von Spanplatten und Schichstoffverbundplatten**. Dissertation TU Braunschweig, 1966.
- KISSELBACH, A. **High Speed Cutting of Wood and Wood Material**. International Conference on Woodworking Technologies. LIGNA, Hannover, 1993.
- KISSELBACH, A. **Hochgeschwindigkeitsfräsen von Massivholz**. Vortrag auf der Fachtagung „Hochleistungszerspanung - Hochgeschwindigkeitsfräsen von Holz und Holzwerkstoffen“, Bielefeld, 3.12.1992.
- KIVIMAA, E. **Die Schnittkraft in der Holzbearbeitung**. Holz als Roh- und Werkstoff, v. 10, 3: S. 94-108, 1952
- KLAMECKI, B.E. **The effect of Extractives on Tool Wear in the Turning of Incense Cedar**. In.: Proceedings of the fifth Wood Machining Seminar, Richmond, Califórnia, Forest Products Laboratory, University Califórnia, p. 5-14. 1997.

-
- KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of wood science and technology: wood based materials**. Berlin: Spriger-Verlag, 1975.
- KOLMANN, F.F.P.; COTÊ, W. A. Jr. **Principles of Wood Science and Tecnology / Solid Wood**. New York (USA). Springer-Verlag. Vol I. 1984.
- KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**, 4. Aufl., VDI – Verlag, Düsseldorf, 1990.
- KRONNENBER, M. **Grundzüge der Zerpanungslehre**. Band 1-3, Springer Verlag, Berlin. 1963.
- LACH, H. **PCD tools for woodworking**. In.: **Diamonds in Industry: Woodworking with Syndate /Debeers**. P22-23. Alemanha. 1994.
- LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos Trópicos: Ecossistemas Florestais e Respectivas Espécies Arbóreas – Possibilidades e Métodos de Aproveitamento Sustentado**. Ed. GTZ GmbH, Eschborn, 1990.
- LANCHAS, A. **Particularidades de la madera y principios generales para aumentar su durabilidad al exterior (I Parte)**. In.: **PROTECMA: revista de Protección de la madera**. Sinal ediciones, 3º trimestre, nº.1, p. 18-25. 1998.
- LARRAIN, S. **Perspectivas e Projeções dos Produtos de Florestas Plantadas do Brasil no Mercado Internacional**. III Seminário sobre Processamento e Utilização de Madeiras de Reflorestamento. P. 15-24. Curitiba. 1994.
- LICHER, E. **Optimierung von Zerspanprozessen mit veränderlichen Randbedingungen am Beispiel der Formatbearbeitung**. Diss. TU Braunschweig, 1993
- LIMA, S.E.M. **Influência no Comércio Internacional de Produtos Florestais**. III Seminário sobre Processamento de Madeiras de Reflorestamento. P. 33-36. Curitiba. 1994.
- MARIOLANI, J.R.L.; HEISEL, U. **Influência da geometria da ferramentas e das condições de usinagem no torneamento de alumínio com diamante monocristalino**. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas. Rio de Janeiro, v. XIV, n. 1. 57-74. 1992.

-
- MAYER, A. **Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Einsatz von Schnellfrequenzspindel.** Dissertation TH Darmstadt. 1989.
- MICHELETTI, G. F. **Tecnologia Meccanica – Il taglio die metalli.** 2. Ed. Torino: Unione Tipografico – editrice Torinese. 1977.
- MINISTÈRIO DO DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA; COMÈRCIO E TURISMO. **Estratégia Setorial para Melhorar a Competitividade: Papel e Celulose.** 1997.
- MINISTÈRIO DO MEIO AMBIENTE. **Formulação de Políticas Públicas Compatíveis com os Princípios de Desenvolvimento Sustentável Definidos na Agenda 21: Redução das Desigualdades Sociais.** Consórcio Parceria 21. 1999.
- MUTSCHLER, W. **Aktuelle Entwicklung im Holzbearbeitungs-maschinenbau.** 10. Holztechnisches Kolloquium, Braunschweig; Vulkan Verlag, 1995.
- N.N. **Catálogo da Firma Leitz.** 1999.
- NEWTON, C. et alli. **A Questão Ambiental: O Que Todo Empresário Precisa Saber.** Brasília: SEBRAE. 1996.
- NIEMEYER, W.-H. **Effektive Absaugtechnik durch optimierte Gestaltung von Späneerfassungssystemen.** 9. Holztechnisches Kolloquium, Braunschweig; Vulkan Verlag, 1995.
- NIEMZ, P. **Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe.** DRW-Verlag. 243 S. 1993.
- PAHLITZSCH, G. **Internationaler Stand der Forschung auf dem Gebiet des Hobelns und FräSENS von Holz und Holzwerkstoffen.** Holz als Roh- und Werkstoff 24, 12: S579-593, 1966.
- PAHLITZSCH, G., SCHULZ, K. **Schnittkraftmessung und Schneidenabstumpfung beim Hobeln von Holz mit kreisender Schnittbewegung.** Holz als Roh- und Werkstoff 15; 4: S. 159-170, 1957.
- PALLEROSI, C.A. **Formulação de um método geral de Análise das Condições econômicas de Usinagem.** Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade de Campinas – SP. 1972.

-
- PATURI, F.R. **Moderna Tecnologia Ambiental**. In. Deutschland: Revista de Política, Cultura, economia e Ciência. P. 26-29. Bonn. 1995.
- PIRES, I.E.; PAULA, R. C. de. **Estado da Arte do Melhoramento Genético para a Qualidade da Madeira de Eucalipto: Uma Revisão**. In.: IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalyptus, v. 3, p. 186-191. Salvador, Bahia. 1997.
- PORANKIEWIECZ, B. **Does Exist the Chemical Corrosion of Carbide Cutting Edge When Milling Melamine Coated Particle Board?** The International Seminar, Agricultural University of Pozmán. 1993.
- PROKES, S. **Abstumpfungsverhalten der Holzbearbeitungswerkzeuge**. HOB - Die Holzbearbeitung 4, 1970
- PROKES, S. **Einfluß der Ausgangqualität von Schneiden aus Werkzeugstahl auf die Abstumpfung**. Holztechnologie Jahr 2, Z. 3, S. 234-238. 1961.
- SACHSSE, H. **Die Beurteilung von Holzoberflächen**. Holzzentralblatt, Nr. 69, 10. Juni. S. 1137-1139. 1994.
- SALJÉ, E. STÜHMEIER, W. **Grundlagen der Zerpanung mit Messerwellen**, Teil 2: Aufbau von Messerwellen, Doppelkamm-Messer, Holz- und Werkstoffverarbeitung, 10. 1986.
- SALJÉ, E., LIEBRECHT, R. **Begriffe der Holzbearbeitung**, Teil 1, Fräsen, Kreissägen, Vulkan Verlag, Essen. 1983.
- SALJÉ, E., STÜHMEIER, W.; KEUCHEL, K. **Untersuchung des Einflusses verschiedener Spanplattenkomponenten auf die Zerspanbarkeit beim Fräsen, Kreissägen Bohren und Bandschleifen**. Abschlußberichte AiF-Vorhaben 4621, 6086, 1988.
- SALJÉ, E.; DRUBBENKROPP, G. **Zerspanbarkeitswerte beim Fräsen von Holz**. Holz als Roh- und Werkstoff 35 (1977).
- SALJÉ, E.; DRÜCKHAMMER, J.; STÜHMEIER, W. **Neue Erkenntnisse beim Fräsen von Spanplatten mit unterschiedlichen Schnittbedingungen**. Holz als Roh- und Werkstoff, 43: S. 501-506, 1985.

-
- SANDVOß, E. **Untersuchungen über den Schneidenverschleiß beim Fräsen von Holzwerkstoffen.** Dissertation TU Braunschweig, 1971.
- SCHADOFFSKY, O. **Meßtechnisches Erfassen und Bewerten von Massivholzoberflächen.** Abschlußbericht des IWF AiF 9681, Braunschweig, 1996.
- SCHMITT, Th. **High Speed Milling Machines.** Seminário de Usinagem com altíssima velocidade de corte. Fresamento, Torneamento, Furacão. Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 1996.
- SCHNEIDER, M. **Leichtbauvorschubeinheit an Werkzeugmaschinen.** Industrieanzeiger, v. 69/1, S. 35-36. 1988.
- SCHNEIDER, M. **Statisches und dynamisches Verhalten beim Einsatz linearer Schienenführung auf Wälzlagerbasis im Werkzeugmaschinenbau.** Dissertation TH Darmstadt. 1991.
- SCHNETTKER, T.; GORGES-FARIAS, M. **Leiststeigerung des Bandsägens zur wirtschaftlichen Fertigung Konturierter Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen.** Abschlußbericht AIF10506. Braunschweig. 1998.
- SCHOWCKRY, A. S. **The effect of cutting conditions on dimensional accuracy.** Wear, vol. 80, p. 197-205. 1982.
- SCHULZ, H. **Hochgeschwindigkeit metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe.** Carl Hanser Verlag. München, Wien. 1989.
- SCHULZ, H.. **Einsatzmöglichkeiten des HochgeschwindigkeitsfräSENS.** 2. Darmstädter Fertigungstechnisches Symposium HSC (Hochgeschwindigkeitsbearbeitung). Darmstadt, 1987.
- SIQUEIRA, J.P. **Balanço de Ofertas e Demanda.** III Seminário sobre Processamento de Madeiras de Reflorestamento. P. 71-76. Curitiba. 1994.
- SME. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook.** 4. Ed. Dearborn/Michigan: SME, v. IV Quality Control and assembly, cap. 5 Surface Technology – Surface Integrity. 1987.

-
- SOUZA, M.H et. alli. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Laboratório de Produtos Florestais. 1997.
- STEFANIAK, V.W. **Einfluß der Schnittgeschwindigkeit auf das Abstumpfen Harmetallbestückter Sägeblätter beim Schneiden von Spanplatten**. Holztechnologie 12, 1: S. 9-15, 1971.
- STEMMER, E. C. **Ferramentas de Corte I**. Ed. da UFSC. Florianópolis, 3. Ed. 1993.
- STEMMER, E. C. **Ferramentas de corte II**. 2º ed. Florianópolis. Ed. da UFSC. 1995.
- STÜHMEIER, W.; **Fräsen von Spanplatten mit hochharten Schneidstoffen**; Diss. TU Braunschweig, 1989.
- STUMPF, E. **Um Mercado para Bons Investidores**. In.: Revista da Madeira. P. 24-26. 1996.
- SUDARAM, R.M.; LAMBERT, B. K. **Surface Roughness Variability of AISI 4140 Steel in fine turning using carbide tools**. Int. J. Prod. Res., n. 17(3), p. 249-258. 1979.
- SZÜCS; C.A. **Autoconstrução em Madeira**. In.: IV Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira. São Paulo. 1992.
- SZÜCS; C.A. **Influência da variação da densidade da madeira sobre o seu módulo de elasticidade**. 1996.
- TAVARES, R.C. **Projeto conceituai de uma fresadora de altíssima velocidade de corte**. Qualificação para a Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, 1999.
- TAYLOR, J. **Tool Wear, life and surface Finisch**. Proceedings of the International Production Engineering Research Conference, p. 130-136. New York: ASME. 1963.
- TOMASELLI, I. **Influência de Aspectos Ambientais no Mercado Nacional de Produtos Florestais**. III Seminário sobre Processamento de Madeiras de Reflorestamento. P. 25-31. Curitiba. 1994.

-
- VERLANGIERE, J.O. et alli. **Conservação do Meio Ambiente através de um Sistema Nacional Integrado**. In.: Meio Ambiente e Segurança Pública. P. 135-144. Florianópolis. 1992.
- WADKIN plc, Indústria de Usinagem de Madeiras. **Wood Products Latch on PCD**. In.: Diamonds in Industry: Woodworking with SYNDATE / DeBeers. P. 13-16. Londres. 1994.
- WALTZ, F. **Machining Wood and Plastics with Syndate Tools**. In.: Diamonds in Industry: Woodworking with Syndate / Debeers. P.17-18. Suíça. 1994
- WEBER, M. **Magnetostriktive Schnittkraftmessungen beim Holzfräsen**. Holz als Roh- und Werkstoff Jahr 20, Z. 12, S. 486-492. 1962
- WECK, M. et all. **Konstruktion von spindel-Lager-System für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung**. Ehningen, 1990 [1].
- WECK, M., SCHUBERT, J. **Genormte Steilkegel-Alternative, NC-Fertigung**. Teil 1: 1/1993 S. 22-24, Teil 2 2/93, S. 42-44.
- WEINERT, et alli. **Wechselwirkung Bearbeitungsverfahren – Beschichtung Auswirkungen auf die Oberflächenqualität von Kanteln aus Holz**. Bericht des Institutes für Holztechnologie Dresden. 1996
- WERNECK, D. **Para que as Empresas Brasileiras Sejam Mais Competitivas**. In.: Techoje – uma revista de opinião. Belo Horizonte. 1997.
- WESTKÄMPER, E.; FUB, M. **Hochgeschwindigkeitsfräsen von Holzwerkstoffen mit PKD**. IDR (1992) 4, S. 286-290.
- WESTKÄMPER, E.; FUB, M. **Hochgeschwindigkeits-Stirnplanfräsen mit Vorteilen**. HOB 39 (1992) 9, S. 38-40.
- WESTKÄMPER, E.; FUB, M. **Umfangsplanfräsen mit sehr hohen Schnittgeschwindigkeiten**. HK 27 (1992) 10, S. 1114-1118.
- WESTKÄMPER, E.; FUB, M.; KISSELBACH, A. **Leistungs- und Qualitätssteigerung durch Hochgeschwindigkeitszerspanung**. Teil 1: HOB (1993) 11, S. 100-104, Teil 2: HOB (1993) 12, S. 36-40.

-
- WESTKÄMPER, E.; RIEGEL, A. **Qualitätskriterien für geschleifene Massivholzoberflächen.** Holz als Roh- und Werkstoff, 51. S.121-125. 1993.
- WESTKÄMPER, E.; RIEGEL, A. **Rauheitsmessungen na Holzoberflächen.** Holz als Roh- und Werkstoff, 50, S. 475-478. 1992.
- WESTKÄMPER, E.; SCHADOFFSKY, O. **Oberflächentopographie von Massivholz.** HOB 3/5. S. 74-78. 1995.
- WESTKÄMPER, E.; SCHADOFFSKY, O. **Oberflächentopographie von Massivholz (Teil 2).** HOB 4. S. 50-54. 1995.
- WESTKÄMPER; E.; MASKUS; P. **Abformen Technischer Oberflächen.** VDI-Z 132 GmbH, Düsseldorf, 1990.
- WESTKÄMPER; E. et alli. **Gefügeschädigungen als Standzeitkriterium?** HK – Holz und Kunststoffverarbeitung. Teil 1: 9/1997, S. 47-49. Teil 2: 10/1997, S. 43-45. Teil 3: 11/1997, S. 80-83.
- WIELE, H. et alli. **Verbesserung des Thermischen und dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinenbauteile durch Verbundkonstruktion aus Metall und Mineralguß.** dima – die Maschine 5/6 – 94 S. 55-59. 1994.
- WILSON, E. O. **A Diversidade da Vida.** Coleção: Ciência Aberta. 1998.
- WORLD COMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future.** Oxford: New York University Press. 1987.
- World Wide Fund for Nature (WWF). **Desenvolvimento Sustentável.** In.: Grandes Temas. 1998

A. CARACTERIZAÇÃO, HISTÓRICO E TENDÊNCIAS DO SETOR FLORESTAL

A.1. A HUMANIDADE E AS QUESTÕES AMBIENTAIS

A possibilidade de esgotamento dos recursos naturais não preocupava a humanidade quando, no século passado, a Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra, se espalhou pela Europa e pela América do Norte. Naquela época, o crescimento econômico estava inevitavelmente ligado a setores produtivos altamente poluentes, como a mineração.

Depois da II Guerra Mundial, a intensificação das atividades econômicas e o grande crescimento populacional começaram a colocar em xeque o modelo de desenvolvimento econômico vigente. Nunca a pressão sobre os recursos naturais havia sido tão intensa. A demanda mundial por diferentes fontes de energia é um exemplo disso. Em 1990, era quatro vezes maior do que em 1950 e 20 vezes maior do que em 1850. Nunca a humanidade cresceu tanto. Em 1950 éramos 2,5 bilhões de pessoas e agora já ultrapassamos a marca de 6 bilhões [WWF1998].

O crescimento econômico e populacional das últimas décadas têm sido marcado por muitas disparidades. Os países do Hemisfério Norte possuem quatro quintos da população do planeta, detêm quatro quintos dos rendimentos mundiais e consomem 70% da energia, 75% dos metais e 85% da produção de madeira mundial [WWF1998].

Em geral, os problemas ambientais dos países desenvolvidos são associados à riqueza econômica, ao exagerado nível de consumo e à industrialização. Nos países em desenvolvimento, os maiores problemas ambientais estão normalmente associados à pobreza, aos altos índices de crescimento populacional e à desertificação [HZB1997].

Desta forma, governo e sociedade promovem debates sobre os modelos que devem ser adotados, pois o desenvolvimento econômico é vital para os países mais pobres, mas o caminho a seguir não pode ser o mesmo adotado pelos países industrializados. Mesmo porque isso não

seria possível, caso as sociedades do Hemisfério Sul copiassem os padrões das sociedades do Norte, pois a quantidade de combustíveis fósseis consumida, atualmente, aumentou 10 vezes e a de recursos minerais, 200 vezes [WWF1998]. É cada vez mais evidente que a Terra não seria capaz de agüentar a população humana se todos adotassem os altos padrões de consumo dos países do Primeiro Mundo.

Conta-se que Mahatma Gandhi, ao ser perguntado se, depois da independência, a Índia perseguiria o estilo de vida britânico, teria respondido: "... a Grã-Bretanha precisou de metade dos recursos do planeta para alcançar sua prosperidade; quantos planetas não seriam necessários para que um país como a Índia alcançasse o mesmo patamar?"

O século XXI define-se como de liberdade e saúde para os povos com profundos e amplos conhecimentos científicos e tecnológicos. Os Estados que não souberem manejar os vínculos com a natureza e com a própria estrutura somática ou psíquica de seu povo, não permanecerão apenas no plano do servilismo que marcou as nações pobres no período colonial europeu sobre o mundo, e no domínio imperial exercido pelos Estados Unidos da América (EUA). Sem a ciência e desprovidos da tecnologia usufruída pelos outros povos, as coletividades que hoje perdem seus meios de produção, reprodução e invenção de novos conhecimentos que buscam soluções para os problemas locais têm seu destino, nada lisonjeiro, selado.

Os movimentos ecológicos internacionais e os interesses dos chamados „países de primeiro mundo“ nas riquezas da floresta amazônica associados a insuficiência de informações silviculturais e tecnológicas sobre espécies nativas e plantadas e a falta de eficiência econômica dos países em desenvolvimento, que não promovem a agregação de capital e o bem estar social, entre outros fatores, gerou diversas pesquisas e seus resultados contribuíram para a discussão sobre a utilização econômica das florestas plantadas.

Este aumento das exigências para a utilização de recursos de florestas renováveis foi consequência da percepção que a reposição dos recursos naturais não ocorre na mesma medida que é extraído.

As mudanças de comportamento quanto aos aspectos ambientais promovem uma reestruturação no mercado internacional de matéria-prima e de produtos florestais. A madeira obtida a partir de “Floresta Plantada” tem importância ascendente num mercado, onde além das pressões ecológicas, também a necessidade de redução de custos e a manutenção da competitividade são vitais.

A antiga estratégia de somente tentar reduzir custos, com todas as ferramentas possíveis não atende mais as necessidades do mercado globalizado, agora o essencial é ampliar a agregação de valor na produção através do emprego de novas tecnologias, que permitem o desenvolvimento de novos produtos simultaneamente segundo os conceitos de “*design*”, de ergonomia e de desenvolvimento sustentado [WERNECK, 1997].

O desenvolvimento econômico está atento as questões ambientais internacionais com os chamados rótulos ecológicos, baseados na certificação ambiental de matéria-prima e de produtos. Este é um poderoso mecanismo criado nos países mais desenvolvidos que através da educação e da informação ao consumidor utiliza as forças de mercado como indutoras de ofertas de melhores produtos do ponto de vista ambiental, proporcionando novas oportunidades de negócios para as empresas.

Em 1977, teve início na Alemanha a certificação ambiental com o selo „Blue Angel“, que teve amplo apoio da ISO - *International Organization for Standardization*, que é uma federação mundial, não governamental, fundada em 1947 com sede na Genebra, Suíça, que congrega organismos nacionais de normalização. Ela é composta por mais de 100 países, representando praticamente 95% da produção industrial do mundo [NEWTON, 1996].

A ISO tem como objetivo propor normas que representam e traduzem o consenso dos diferentes países do mundo para homogeneização, entre outros aspectos, de procedimentos, medidas, materiais e seu uso, em todos os domínios de atividades, exceto no campo eletrônico, cuja responsabilidade é da IEC - *International Electrotechnical Commission*. Os representantes dos diversos países discutem, analisam e chegam ao consenso quanto a uma determinada norma.

Como instituição normalizadora internacional, a ISO elabora e avalia normas por intermédio de vários comitês técnicos, compostos por especialistas dos diversos países membros.

A conferência das Nações Unidas de Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED-Rio'92), representou impulso decisivo para o movimento de normalização ambiental internacional. Em relação as propostas de normas ambientais, o comitê técnico especialmente designado para o assunto foi o de número 207 (TC207), intitulado Gestão Ambiental, que conta com a participação de 56 países. Este comitê está interrelacionado com o comitê responsável pelas normas de qualidade de número 176 (TC176). As normas foram batizadas de ISO série 14000 [ONU1996].

Com a implantação, em 1993, do comitê específico e independente para gestão do Meio Ambiente, a ISO ampliou sua participação no tema de forma irreversível. Da atuação em normas técnicas de especificação de critérios e metodologias de medição de parâmetros, ela passou a elaborar normas de orientação gerencial para a organização em relação ao meio ambiente.

Com a globalização da economia, que é um processo de aceleração capitalista em ritmo jamais visto, de um mundo sem fronteiras, e que repercute principalmente na questão do meio ambiente. O grande mercado importador dos países desenvolvidos passa a fazer exigências ambientais às empresas fornecedoras (transnacionais ou não) situadas nos países em desenvolvimento. São barreiras não-tarifárias, criadas a partir de uma “consciência mundial” preservacionista e se usam de normas internacionais para a imposição do seu poder econômico, como ficou claramente definido na cerimônia de implantação do comitê técnico ISO/TC-207, em Toronto, onde consagrou-se a posição de que „a batalha da preservação ambiental será ganha ou perdida nos países em desenvolvimento“ [Gestão Ambiental, 1996]. Assim, não existem mais limites para as empresas. Elas compram matéria-prima em qualquer lugar do mundo, em função da qualidade e preço; instalam fábricas nos países onde os custos de produção fiquem mais em conta, não importa se em países da América Latina ou da Ásia; e, vendem seus produtos para o mundo inteiro.

A globalização implica de fato em conseqüências de todo o tipo na vida das empresas, principalmente micro e pequenos empreendimentos. O livre comércio internacional acirra a concorrência e passa a exigir mais qualidade, produtividade e competitividade das empresas domésticas.

Em poucos anos os valores ambientais evoluíram de um interesse marginal para o topo das preocupações, principalmente dos consumidores no mundo ocidental mais desenvolvido [ONU1987].

Eco-rotulações, patrocinadas por órgãos governamentais ou quase governamentais, proliferam em países parceiros comerciais do Brasil. Entre os vários sistemas de „selo verde, citam-se além do „Blue Angel“ da Alemanha, o “Environmental Choice” do Canadá, que define diretrizes para produtos que variam de tintas e fraldas de pano reutilizáveis. O Japão possui seu próprio programa Ecomark. Vários outros países, incluindo os países da comunidade econômica européia como, por exemplo, a Áustria, Dinamarca, França, Holanda, também já possuem ou já estão desenvolvendo eco-rotulações próprias. O Japão está se preparando para surgir como líder em tecnologia ambiental no século XXI. Apesar de um recorde de insatisfação quanto à

preservação de animais selvagens, entre outras questões ambientais, os japoneses criaram tecnologias impressionantes de prevenção de poluição e conservação de energia [NEWTON, 1996].

Para entender um pouco dos problemas que estes sistemas podem trazer aos países em desenvolvimento, apresenta-se o caso do logotipo alemão „Blue Angel“, que até meados de 1992 já havia certificado 814 fabricantes incluindo 3.325 produtos em 75 categorias para ajudar os consumidores a identificarem produtos ambientalmente perecíveis. Entre os fabricantes certificados, nenhum pertencia a países em desenvolvimento [NEWTON, 1996]

O lançamento das normas ambientais da série internacional ISO 14000 representou a consolidação desse fato, destinado a produzir consequências mesmo às empresas cuja produção destina-se somente ao mercado interno. A conquista do certificado ISO 14000 será sempre um diferencial importante, tendo em vista o crescimento de uma conscientização ambiental, além do atendimento aos requisitos legais [ABNT1996].

A análise de um produto para o recebimento do selo verde considera o levantamento global do impacto do mesmo em todo seu ciclo de vida, incluída a sua produção, distribuição, uso e descarte. A implantação de um sistema de selo verde tem normalmente recebido suporte financeiro de governos ou grupos interessados na matéria e segundo estudos conduzidos pelo SELA (Sistema latino-americano), com apoio da UNCTAD/GATT (ITC – International Trade Centre), considerava pouco provável que a curto prazo o sistema pudesse se tornar autoconfiável. A grande maioria dos selos verdes não considerava o processo de extração da matéria-prima, diferindo, portanto dos sistemas de certificação de origem para o caso de madeiras.

Foi criado, então, em 1993, o Conselho de Manejo Florestal, mais conhecido pela sigla em inglês *FSC - Forest Stewardship Council*, organização internacional independente, que tem por finalidade incentivar o manejo correto das florestas. A certificação de unidades florestais exploradas por empresas é sua principal forma de atuação, embora, de forma geral, o FSC promova a qualidade ambiental, a cidadania e a consciência do consumidor. Essa certificação é realizada por organizações credenciadas e resulta num selo verde que distingue e confere maior valor ao produto feito com os insumos extraídos da área florestal certificada. No Brasil, desde 1995 há um grupo de trabalho que determina padrões locais/regionais nos moldes do FSC e que são utilizados pelas certificadoras operando no país.

Entre outras, a medida recomendada é a inclusão da manutenção da biodiversidade pela utilização de sistemas agroflorestais, atendendo tanto a conservação do funcionamento do

ecossistema, pela manutenção dos processos ecológicos básicos, quanto a premente necessidade humana de utilização dos recursos naturais.

A biodiversidade desempenha uma função-tampão fundamental contra as perturbações, mantendo sadias as atividades dos microorganismos do solo, que representam o elo vital da produtividade do sítio [WILSON, 1998].

A incorporação da conservação da biodiversidade nos planos de manejo integrado de plantações florestais (silvicultura intensiva) pode ser realizada de forma simples alcançando a diversidade tanto do ponto de vista estrutural quanto do ponto de vista funcional do ecossistema:

- Deixar no campo as folhas, os ramos finos e a casca como forma de contribuir para a manutenção da produtividade do sítio e de evitar a perturbação exagerada do piso florestal (biodiversidade estrutural);
- incentivar a existência de espécies fixadoras de nitrogênio ao longo da área (aspecto funcional);
- esquema global de manejo através da formação deliberada de um mosaico de condições ao longo da área florestal, incluindo aqui o corte raso de faixas, ou de áreas alternadas, favorecendo a existência de espécies da avifauna, que dependem de áreas abertas para a procriação e para outras necessidades;
- favorecer a diversidade etária das plantações;
- aumentar o quanto possível o número de hábitat ao longo da área, tais como áreas abertas, áreas de borda, reservas naturais, áreas encharcadas, açudes etc.;
- distribuição estratégica de reservas naturais ao longo da área, preferencialmente interligadas por corredores de vegetação natural; e,
- repensar a utilização de fertilizantes e herbicidas, uma vez que podem afetar a fauna e os microorganismos do solo; etc.

Naturalmente, para a implementação destas soluções se necessita uma redução da área utilizável, e quiçá com algum custo adicional, que devem ser identificados no planejamento do empreendimento florestal para se manter competitivo no mercado globalizado e pela maximização da resiliência [De PAULA LIMA, 1996].

Em países desenvolvidos, as certificações ambientais significam para as empresas ampliação de mercado e garantia de consumidores fiéis. São aspectos aos quais as micro e

pequenas empresas também devem estar atentas, promovendo ações de respostas positivas frente às novas demandas ambientais, sempre em busca de maior competitividade.

Em 1993, as indústrias brasileiras investiram 432,2 milhões de dólares em proteção ambiental, sendo mais da metade desses recursos oriundos do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e suas subsidiárias BNDESPAR e FINAME. Os setores de papel e celulose, siderurgia, química e petroquímica estão na ponta do processo, responsáveis que são por 71% da parcela financiada pelo BNDES. Entre 1990 e 1995, os investimentos ambientais financiados pelo BNDES atingiram 1,6 bilhão de dólares.

Ainda, no Brasil, em 1995 foi firmado pelos Bancos Federais o “Protocolo Verde”, que aderiu à Declaração dos Bancos para o Meio Ambiente e desenvolvimento sustentável do *PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente*. Entre os focos previamente definidos de atuação destaca-se o programa de preservação das florestas tropicais (floresta amazônica) e subtropicais (mata Atlântica) através do patrocínio de viveiros de mudas para a recuperação de matas nativas. Aderiram também a este programa o Banco do Estado de São Paulo - BANESPA, a União dos Bancos Brasileiros - UNIBANCO e a Financiadora de Programas e Projetos Especiais - FINEp. A FINEp atua também como agente técnica do Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais do Brasil – PPG7, cujo o objetivo é a implementação de um modelo de desenvolvimento sustentável em Florestas tropicais brasileiras [Meio Ambiente Industrial, 1999].

A.2. A HUMANIDADE E A MADEIRA

A madeira tem sido, historicamente, o principal vínculo de muitas culturas. A madeira é, talvez, o recurso mais antigo de que o homem dispunha para satisfazer suas necessidades básicas. Estas civilizações antigas se supriam de energia, material de construção, alimentos, armas, móveis, instrumentos musicais e toscas ferramentas oriundas de madeira.

Esta primitiva associação entre o homem e a madeira se perpetuou e parece não se romper tão cedo. Enquanto o homem evoluiu cultural e tecnologicamente, a madeira continuou se revelando apta a suprir as novas exigências que lhe eram impostas, seja na indústria carbonífera, indústria do lazer, moveleira e na habitação. Várias culturas do passado tiveram na madeira o seu sustentáculo. Seu primeiro uso foi para construir abrigos, função que continua desempenhando muito bem até os dias atuais [BOHN, 1995].

Estudos realizados na Alemanha tanto pela Federação de construtores de casas pré-fabricadas como pela indústria moveleira, dá-se preferência à madeira como matéria-prima, que se regenera e é por isso ecológico, além de exigir pouco consumo de energia para o seu processamento, ao contrário de outros materiais. Conclui, ainda, que numa construção bem feita, a madeira é um isolante térmico ideal [PATURI, 1995]. A história também atesta a importância da madeira na fabricação de veículos de transporte, notadamente transporte naval. A hegemonia naval e comercial de algumas nações tinha como sustentáculo uma vasta reserva florestal de madeiras próprias para a fabricação das embarcações [BODIG, 1982].

A.3. SIGNIFICÂNCIA ECONÔMICA DA MADEIRA

A madeira e seus derivados apresentam uma significância econômica cada vez maior para as nações, principalmente para as desenvolvidas e industrializadas, porque, se não a produzem, compram e lhe agregam valor.

Na América do Norte, durante a década de 1970, foram usados mais produtos de madeira do que todos os outros materiais combinados. Além do mais, o consumo mundial de madeira é igual a produção de ferro e de aço [BODIG, 1982].

Atualmente existem muitas mais formas de aplicação da madeira. A madeira é a principal matéria-prima para a indústria madeireira, seja na indústria de madeira processada como, por exemplo, moveleira e da construção civil (unifamiliares e pequenas moradias coletivas), na indústria de papel e celulose, na indústria de embalagens, na indústria siderúrgica e na carbonífera.

Devido a grandes modificações na disponibilidade de alguns recursos naturais, outras fontes de matéria-prima se fizeram necessárias. A madeira, por ser fonte renovável, é uma destas alternativas. Assim, por exemplo, a forma tradicional de madeira serrada nas construções e na indústria moveleira, em função dos custos, está sendo substituída por novos derivados de madeira altamente elaborados como, por exemplo, MDF - *Medium density fiber* (fibra de média densidade, OSB - *Oriented Strand Board* (fibra de madeira orientada e prensada a 220°C), aglomerado - *particleboard*, compensado - *plywood* e chapa dura - *wet hardboard*.

A madeira serrada está sendo destinada a fins mais nobres, no mercado interno e externo como móveis “classe A” e, ainda, para a exportação de produtos elaborados e semi-elaborados

de alto valor agregado, que, do ponto de vista prático só serão realmente competitivos se fabricados através do emprego de novas tecnologias, já que com isto teria-se a possibilidade de fabricação dos elementos de móveis com melhor precisão e com geometria complexa imposta pelos “*designer*”, e, ao mesmo tempo, com possível redução nos custos de fabricação.

A madeira é um dos muitos recursos naturais cujo o uso e a produção estão estreitamente relacionados ao bem estar humano (abrigo, energia, alimentos, móveis, instrumentos musicais, indústria do lazer, etc.). Chega-se a reconhecer aos poucos que todas estas funções essenciais da sociedade humana estão intimamente ligados e que a modificação em uma delas pode mudar substancialmente outras [BOHN, 1995].

O setor florestal participa cada vez mais no desenvolvimento de um país, não apenas sob o aspecto econômico, como fonte geradora de divisas, renda e de emprego, mas também do lado social, como componente indispensável à manutenção da qualidade de vida [Ministério do Meio Ambiente, 1999]. Além do Brasil ter condições excepcionais para o desenvolvimento da atividade florestal, o setor busca também desenvolver-se tanto na área tecnológica, quanto na de processamento em função de um mercado mais competitivo e ao mesmo tempo mais exigente [GRANDO, 1994].

Neste contexto, é importante salientar, que a carência de recursos humanos adequados qualitativa e quantitativamente, a insuficiência de meios, a falta de conscientização e educação ambiental e a situação econômica do Brasil têm provocado a destruição da biodiversidade, da qualidade do ar, a incidência de doenças respiratórias, acidentes rodoviários, fechamento de aeroportos, perdas de vida humana e de patrimônios ecológicos. Modernamente o meio ambiente passou a ter interesse difuso, portanto, inerente a todos os cidadãos, independentes ou não de usufruí-lo. Tornou-se, portanto, um bem estar da sociedade e por isto, deve receber das instituições organizadas a incumbência de sua proteção e da otimização de sua utilização. A sua importância transcende aos interesses individuais a ponto de, inclusive, restringir o direito de propriedade [VERLANGIERE, 1992; IBAMA, 1994; LARRRAIN, 1994; Ministério do Meio Ambiente, 1999].

Consequentemente, a necessidade mundial de matéria-prima de curto ciclo despertou inúmeras pesquisas e discussões sobre os tipos e a rentabilidade das atividades silviculturais, que procuram atender as exigências de uma sociedade preocupada com a biodiversidade, e que busca mecanismos para harmonizar os dois objetivos de desenvolvimento sustentado proposto pela

ONU (Organização das Nações Unidas): desenvolvimento econômico e conservação ambiental [ONU1987].

A.4. TIPOS DE SILVICULTURA

O *timing* e a coordenação dos investimentos são dimensões essenciais no mercado internacional, principalmente no setor florestal [De PAULA LIMA1996].

A oferta mundial em todos os segmentos do setor tende a crescer em saltos, não só porque cada planta agrega capacidade produtiva considerável, os investimentos concentram-se em períodos de crescimento da demanda, quando preços mais adequados geram acumulação de recursos nas empresas. A maturação simultânea dos investimentos tende a provocar excesso de oferta, caracterizando ciclos marcantes de alta e baixa de preços, e fortes oscilações no investimento.

Os projetos de expansão incluem a incorporação de ganhos de escala e a modernização tecnológica de processos e produtos de maior valor agregado, melhoria ambiental e a racionalização industrial (atualização de equipamentos, desenvolvimento de processos e automação industrial) [Ministério da Indústria e do Comércio, 1997].

No plano internacional, o Setor vive um cenário de crescente competição, onde mecanismos de estímulo de desenvolvimento à atividade florestal e a preservação das florestas tropicais e subtropicais são determinantes nas decisões de investimento. Entre os principais incentivos existentes em outros países destacam-se: garantias de créditos bancários, renúncia fiscal, empréstimos com juros promocionais, subsídios para implantação de florestas, proteção contra a expropriação de terras plantadas, participação societária em projetos privados, concessão de terras produtivas públicas a longo prazo, fornecimento de assistência técnica, incentivos ao desenvolvimento de pesquisas tecnológicas em todos os níveis de produção, doação de mudas e insumos florestais, parceria público-privada para a construção de infraestrutura e criação de seguros florestais [MDIC1997].

A „silvicultura clássica“ procura atingir os objetivos pré-determinados através de apropriada condução e de um ideal de aproveitamento sustentado do potencial de produção natural oferecido pelo sítio, isto é, por intermédio de um conseqüente manejo do ecossistema [LAMPRECHT, 1990].

A silvicultura clássica é relativamente mais barata, porque recorre as forças produtivas decorrentes do sítio, que nada custam. As possibilidades de produção são por isso determinadas pelas condições do sítio, sendo assim bastante limitadas. Por motivos econômicos, são possíveis transformações na composição e na estrutura de florestas naturais; seus limites, porém, são determinados pela necessidade de não ameaçar a estabilidade natural condicionada pelo ecossistema.

O Brasil possui em torno de 40% da sua área coberta de florestas naturais. São aproximadamente 3,4 milhões de km², que corresponde à área **florestal** da Europa. Localizam-se predominantemente nos Estados da Amazônia, Pará, Tocantins, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. No Sul do País encontram-se, ainda, manchas de tamanhos diversos, florestas primárias e secundárias. Estas florestas apresentam uma biodiversidade singular que de acordo com a política ambiental internacional, predominantemente gerenciada pelas super potências econômicas mundiais, precisam ser preservadas como patrimônio da humanidade [STUMPF, 1996].

Por um lado, a viabilização do manejo florestal sustentável é a solução para a exploração madeireira adequada sob o aspecto econômico, através da necessidade do uso de maior variedade de madeiras, para dar um aproveitamento econômico as espécies, que são eventualmente queimadas ou deixadas a apodrecer na mata, quando da exploração das espécies mais conhecidas, por não terem valor no mercado.

Entretanto, muitas vezes, mesmo muitos esforços pela conservação produzem resultados muito abaixo do desejado porque é **insuficiente o conhecimento sobre as espécies, os ecossistemas e as características tecnológicas**. Também se conhece muito pouco sobre as conseqüências dos impactos da interferência humana sobre o hábitat natural e sobre a transformação destes de acordo com a sua aplicação.

Através de uma publicação técnica, O IBAMA (Instituto Brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis) procurou contribuir para a viabilização do manejo florestal da Amazônia, mediante o uso de uma maior diversidade de madeiras da região contendo informações técnicas sobre 50 espécies de madeiras tropicais brasileiras consideradas, até então, menos importante para o mercado [IBAMA1997]. Esta atitude corrobora com o Quinto Relatório do Ministério da Agricultura publicado em 1997 pelo Governo Alemão sobre os Princípios para a solução da problemática das florestas tropicais, segundo a utilização/silvicultura eficaz dos produtos florestais [Deutsches Landwirtschaftsministerium, 1997].

Este Relatório serviu de orientação para a política ambiental da comunidade europeia, definiu a posição do Brasil como fornecedor de produtos acabados quando trata dos itens „produtos florestais“. Os países industrializados consideram, ainda, a justificativa para a importação da madeira tropical pelas suas características técnicas especiais, pelo fato de serem bastante decorativas e possuírem bom preço quando comparado com madeiras europeias. Outro fator seria, ainda, a necessidade de utilização de produtos químicos para proteger a madeira europeia para igual aplicação, o que seria ecologicamente incorreto.

Nos casos em que o objetivo reside exclusivamente na produção de madeira, a decisão do método de produção mais adequado reduz-se unicamente à questão de saber qual é o que promete lucros mais elevados. Além disso, nas baixas latitudes é „impossível“ interligar os dois sistemas de silvicultura de maneira a combinar, com elevada produção da silvicultura moderna, os baixos custos e o reduzido risco empresarial dos métodos da silvicultura clássica.

A „**silvicultura moderna**“ opera quase que exclusivamente com florestas plantadas (man-made Forest), ou seja, a formação de florestas a partir de regeneração artificial, que tem sido estabelecidas desde o século passado na América do Norte e na Europa com o propósito de fornecer madeira para fins industriais [De PAULA LIMA, 1996].

Os primeiros ensaios de reflorestamento com espécies do gênero *Eucalyptus* datam de 1834, principalmente com *E. globulus*, na época a espécie mais conhecida. Já havia, nessa época, plantações de eucalipto bem sucedidas na Espanha e Portugal [Pryor 1976 in Lima 1996]. Se sucederam na Índia (1843) e por volta de 1856 já haviam povoamentos bem desenvolvidos de eucalipto na região. No hemisfério sul, em décadas recentes, muitas plantações florestais para fins industriais foram estabelecidas com enorme sucesso, em países não tradicionalmente importantes como produtores de madeira para fins industriais como o Brasil, a África do Sul, o Chile, a Nova Zelândia, etc.

As principais razões da evidente tendência para as plantações industriais foram a não percepção das grandes dificuldades, derivados especialmente de insuficientes conhecimentos dasonômicos, com que se viu confrontada a silvicultura local na tentativa de encontrar um manejo econômico consentâneo com as condições naturais. Em vez de uma diversidade de espécies locais com exigências ecológicas parcialmente desconhecidas e com perspectivas inseguras de comercialização foram e são utilizadas uma ou mais espécies de reflorestamento, internacionalmente conhecidas e comprovadas associadas as informações sobre fontes de

abastecimento e armazenamento apropriados de sementes, sobre métodos de produção de mudas através de melhoramento genético, processos de cultivo e combate a pragas.

Fator decisivo foi o apoio através dos incentivos fiscais e subsídios para investimento concedido pelos governos, em especial, pelo governo brasileiro que entre 1967 e 1977 investiu cerca de US\$300 milhões de receitas fiscais nos reflorestamentos de cerca de US\$2,6 milhões de hectares (BURGER, 1979). Até o ano de 1987, o Programa Federal de Incentivos Fiscais, iniciado em 1965, ainda podia ser utilizado para essa finalidade, embora em escala significativamente menor do que o que foi originalmente estabelecido. Em 1987, todavia, os incentivos fiscais acabaram, e as indústrias agora respondem pelo custo total dos reflorestamentos [De PAULA LIMA, 1996].

Cerca de 85% dos povoamentos eram constituídos por eucaliptos, pinus e teca em 1982 (EVANS, 1982). Teca era considerada um tipo de plantação orientada para a produção de madeiras de alto valor, entretanto não houveram incentivos a plantação porque possui longas rotações, não atendendo a uma exigência fundamental do fator “Disponibilidade de espécies arbóreas florestais apropriadas”, que trata do crescimento rápido, ou seja, curtas rotações.

O Brasil em 1996 já possuía cerca de 6 milhões de ha de floresta plantada, ou seja, 1,5 vezes a extensão territorial da Suíça. Foram plantados predominantemente os gêneros Pinus e Eucalyptus, além da tradicional Araucária angustifolia (Paranapine) e outros diversos [STUMPF, 1996].

Os trópicos e os subtrópicos reuniram pré-requisitos extremamente favoráveis para um sistema de plantações com perspectivas de sucesso:

- Disponibilidade de áreas suficientes e adequadas a esta finalidade;
- a possibilidade de dirigir o empreendimento, exclusivamente, para a produção de madeira, evitando manifestações, por parte da comunidade local, através da conscientização da não satisfação de outras exigências naturais da presença de uma floresta natural, pelo menos não em maiores proporções;
- a disponibilidade de espécies arbóreas adequadas a este regime de manejo; e,
- a existência de mercados capazes de absorver a produção e dispostos a adquirir madeiras de plantações a preços adequados.

O fator „**Disponibilidade de espécies arbóreas florestais apropriadas**“ descreve as seguintes exigências:

Crescimento rápido: Plantações industriais para a produção de madeira ou lenha têm de produzir, por razões de rentabilidade, grandes volumes em curtas rotações. Para a produção de madeiras comerciais de valor, ao contrário, são necessários qualidades superiores de madeira, troncos de boa forma e maiores dimensões.

Destacadas qualidades de espécies pioneiras, principalmente no tocante a vasta amplitude de tolerância às condições de sítio e à capacidade de se desenvolver bem em condições de campo aberto.

Resistência a danos bióticos e abióticos: A segurança do manejo de monoculturas em termos satisfatórios está altamente dependente da resistência das espécies cultivadas em relação ao fogo, a animais domésticos e silvestres, insetos, fungos, ventos, tempestades e extremos climáticos.

Simplicidade na reprodução, manejo e aproveitamento. Nestes aspectos oferecem vantagens as espécies apropriadas para o regime de talhadia, tais como as de eucaliptos.

Entre as milhares de essências arbóreas tropicais nenhuma consegue satisfazer por completo a totalidade destas exigências. Por outro lado, existe nos trópicos um número maior de espécies melhor adequadas para as plantações industriais do que em latitudes de clima temperado (LAMPRECHT, 1990).

As espécies que apresentaram maior amplitude de dispersão provêm originalmente, em sua maior parte, da periferia dos trópicos ou dos subtópicos vizinhos. Sua vantagem decisiva reside na rapidez de crescimento, por vezes insuperável. São por isso possíveis rotações extremamente curtas, ficando geralmente abaixo de 10 anos em plantações destinadas à produção de lenha. Essa marca freqüentemente válida, igualmente, para as voltadas à produção de madeira para fins industriais, cuja rotação raramente supera os 20 anos.

Devido a esta característica pode-se destacar as seguintes vantagens, se houver um planejamento coordenado a nível regional e nacional de empresas de produção e beneficiamento da madeira:

- As plantações industriais são muito interessantes também para investidores privados, avessos a aplicação de capital a longo prazo; e,

- é possível fazer previsões confiáveis sobre a situação do mercado na ocasião da exploração, isto é, torna-se possível adequar a produção as perspectivas de venda.

Existe conseqüentemente uma substancial redução dos riscos bióticos e abióticos. Estatisticamente, o perigo do surgimento de fenômenos perturbadores reduz-se na medida em que diminui o tempo decorrido entre o plantio e a exploração.

Além disso, a disseminação de conhecimentos sobre conservação e otimização dos processos de transformação é vital para a adoção de práticas racionais de uso da natureza, que também têm de ser divulgadas e multiplicadas. Mas o sucesso da disseminação de conhecimento e práticas sustentáveis não pode prescindir da participação e do envolvimento das comunidades que vivem dos recursos naturais.

A medida que a escassez de lenha em muitos países em desenvolvimento começou a chamar a atenção das agências financiadoras internacionais, o Banco Mundial iniciou o fomento a plantação de eucalipto como parte de seu “Programa de Floresta Social”. Quando a notícia das hostilidades locais contra o programa de plantações de eucalipto chegou ao conhecimento do Banco Mundial, o programa foi suspenso, e o Banco exigiu para a aprovação de novos programas um estudo aprofundado sobre o impacto social e o mito que o eucalipto desalojava as culturas agrícolas, causava desemprego, etc. [JOYCE, 1988 in LIMA 1996)].

O crescimento e aprofundamento da pesquisa científica nessas áreas foi, portanto, condição fundamental para permitir decisões e procedimentos de conservação e utilização acertados garantindo assim a continuidade do programa.

De PAULA LIMA [1996] acredita que o efeito do reflorestamento com eucalipto sobre o balanço hídrico de microbacias já seja suficientemente esclarecido, como foi mostrado pelos diversos resultados de pesquisa em microbacias experimentais, e que as informações disponíveis sobre as taxas de transpiração das espécies de eucalipto são, semelhantemente, suficientes para a devida comparação com outras espécies florestais. O estudo do aspecto social sugerido pelo Banco Mundial, realmente, merece maior atenção. Tais estudos poderão, sem dúvida, contribuir para a busca de esquemas ideais de manejo de plantações sensíveis aos reclamos da conservação ambiental, principalmente em relação aos seguintes aspectos:

- As pesquisas em sistemas agroflorestais em geral, a fim de definir combinações adequadas de espécies agrícolas e de práticas agrosilviculturais com o eucalipto, tanto em escala de pequenas propriedades rurais quanto a nível de plantações industriais;

- Os aspectos sociais de uma melhor integração das plantações florestais com as prioridades de uso da terra; e,
- **A implementação de programas integrados de meio ambiente e desenvolvimento no plano local**, levando em conta tendências de mercado, fatores demográficos e vocações regionais, deve buscar soluções que viabilizam a geração de emprego e de renda, e a melhoria das condições sociais para a população.

O aumento crescente do êxodo rural é um dos grandes problemas nos países em desenvolvimento em função da falta de incentivo e perspectivas nas atividades ligadas a agricultura, gerando problemas sócio-econômico e ambientais, principalmente, nas capitais e grandes cidades. Sociais, porque o homem do campo não se adapta ao ritmo da vida urbana. Econômico, pela falta de oferta de empregos para este tipo de mão-de-obra não qualificada as necessidades locais, obrigando-o a trabalhar em subempregos. Ambientais, porque a formação de „favelas“ agride as normas básicas de urbanismo, que é criar condições mínimas de bem estar e saúde para os moradores locais.

Na busca dessas soluções, procura-se somar o conhecimento científico e tecnológico a experiência das comunidades locais ao apoio da sociedade e do governo para conseguir melhores resultados na conservação dos recursos naturais e, simultaneamente, na busca de alternativas sócio-econômicos para a população a médio e longo prazo.

A nível de Brasil, o „Programa Florestal Catarinense“, por exemplo, evoca as condições de clima e relevo apropriadas a silvicultura como alternativa rentável para a economia catarinense, que oferece boas perspectivas a longo prazo para minimizar o êxodo rural e promover a oferta de matéria-prima considerada ecológica, pois as novas oportunidades estão relacionadas a obtenção de florestas para fins nobres (indústria moveleira e de laminados), onde se atinge a maior agregação de valor possível no setor florestal.

A.5. O DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA MADEIREIRA NO BRASIL

O desenvolvimento da indústria madeireira no Brasil esteve sempre associado a ocupação do solo para a agricultura e pecuária, colocando à disposição do mercado grandes quantidades de madeiras a custo baixo. O processo iniciou na Região Sul, com a utilização das florestas de Araucária angustifolia, e repetiu-se na Amazônia [TOMMASELI, 1994].

No Sul do Brasil este processo teve seu maior vigor, pela abundância de araucária, pela fartura das folhosas nobres, pela proximidade dos portos e, principalmente, no passado, pela existência da estrada de ferro que corta os Estados do Sul e que nesta época era o principal meio de transporte por onde escoavam-se a madeira serrada e alguns produtos semi-acabados. No final da década de 60 surge uma nova realidade. Os pinhais estavam acabando, já não existiam tantas folhosas de boa qualidade para serem serradas, laminadas e industrializadas. Começa, então uma verdadeira corrida rumo ao Norte. Principalmente, madeireiros do Sul, Espírito Santo, de São Paulo e Minas Gerais partiam em busca de um novo Eldorado, e assim iniciava-se a exploração florestal do Pará, Maranhão, Mato Grosso, Rondônia, Acre e Amazonas. Nestas novas regiões, a abundância florestal é algo surpreendente e muitas indústrias lá se instalaram. As dificuldades iniciais foram brutais, pois não existiam estradas, energia elétrica e muito menos telecomunicações [GRANDO, 1994].

Estes problemas iniciais e outros fatores expressivos fizeram com que, basicamente no mesmo período em que se corria para o norte em busca de matéria-prima nativa, se iniciasse uma nova corrida para o Sul e parte do Sudeste, onde os fabricantes de papel, chapas compensadas, aglomerados e de fibras, portas, esquadrias, os madeireiros e alguns poucos moveleiros começaram a implantar maciços florestais para suprir suas necessidades de demanda de matéria-prima [GRANDO, 1994].

Não restam dúvidas de que, em ambos os casos (Sul ou Amazônia), mesmo com a presença da indústria madeireira na abertura de novas terras para a agricultura e pecuária, a maior parte da madeira foi simplesmente descartada ou queimada. O principal fator responsável pela perda deste patrimônio nacional foi a velocidade com que o processo de ocupação ocorreu, que não pode ser acompanhado pelo desenvolvimento da indústria madeireira, a qual teve sua disposição, em um determinado período, volumes de madeira muito acima da sua capacidade de transformação [TOMASELLI, 1994].

Com base neste modelo, estabeleceu-se no setor madeireiro uma mentalidade extrativista, e, na maioria dos casos, uma gerência tipicamente familiar. Nas últimas décadas este setor vem gradualmente transformando-se, tanto nos aspectos de mentalidade como na gestão dos negócios. Vários fatores têm contribuído para estas mudanças, e da análise dos fatos que envolveram diretamente o setor concluiu-se que os incentivos fiscais, criados em 1966 e alguns programas governamentais, a exemplo do programa nacional de papel e celulose, tiveram significativa participação [TOMASELLI, 1994; FERREIRA e SANTOS, 1997]. Nesta época, com a criação

dos incentivos fiscais, os volumes plantados efetivaram-se em parques florestais notáveis, tanto que só na Região Sul as empresas madeireiras plantaram 14 bilhões de árvores entre Pinus, Eucalyptus, araucária e outras espécies, num período de mais ou menos 25 anos [GRANDO, 1994].

Nos últimos anos foram surgindo novas condicionantes à sobrevivência da atividade madeireira no país. A recessão econômica levou as empresas nacionais à busca de novos mercados, os quais foram rapidamente identificados como mais exigentes e extremamente competitivos. A indústria madeireira integrou-se gradativamente no esforço pela busca de maior eficiência e qualidade, e os resultados obtidos superaram qualquer expectativa: em 1993 alguns segmentos do setor madeireiro tiveram um crescimento de aproximadamente 100%, como foi o caso da indústria do mobiliário, que exportou cerca de 230 milhões de dólares [TOMASELLI, 1994].

Além do esforço do próprio setor, existiram macrofatores que criaram um ambiente favorável ao desenvolvimento. Entre eles, salienta-se a política externa adotada pelo Brasil, o que possibilitou a aquisição de equipamentos e tecnologias mais avançadas, facilitando a árdua tarefa de reversão de um quadro quase crônico, que primava por baixa eficiência e qualidade. Também foi decisiva a redução de ofertas de madeiras, o que resultou em um aumento dos preços internacionais dos produtos de madeira, estagnados por muitos anos, permitindo ao setor investir na sua modernização e melhor uso dos recursos [TOMASELLI, 1994; GRANDO, 1994; FERREIRA, 1997].

Todo este processo está induzido por novas e substanciais alterações, agora induzidas por preocupações ambientais. Em nível internacional, a busca de produtos considerados „ambientalmente corretos“ tem afetado o mercado, e, embora, no caso de madeiras o maior enfoque seja com respeito a madeiras tropicais, a tendência é de que a médio prazo sejam consideradas as madeiras temperadas e boreais [TOMASELLI, 1994; De PAULA LIMA 1994].

Até o presente, os principais fatores ambientais que têm influenciado no mercado brasileiro podem ser classificados como externos, ou seja, devido a crescente importância do mercado internacional para as empresas brasileiras, alterações naqueles mercados refletem na base de produção nacional e nas ofertas de quantidades e preços feitos para o mercado doméstico [TOMASELLI, 1994; SIQUEIRA, 1994].

Em princípio, ainda levará algum tempo para que o consumidor nacional venha a adquirir um maior nível de consciência a respeito da matéria, a ponto de influenciar o mercado de

produtos de madeira. De qualquer maneira, ele será afetado e provavelmente terá de assumir parte dos custos adicionais gerados pela efetiva implementação do manejo sustentado, segundo os critérios aceitos internacionalmente.

As mudanças de comportamento quanto aos aspectos ambientais trarão também novas oportunidades. Algumas matérias-primas e produtos terão um mercado nacional ascendente. Entre eles menciona-se a madeira de *Pinus* e *Eucalyptus* obtidos a partir de floresta plantada. Contribuirão para o crescimento do mercado destas matérias-primas e de seus produtos, não somente as questões ambientais, mas também a necessidade da redução de custos e a manutenção da competitividade.

A.6. O DESENVOLVIMENTO MADEIREIRO EM SANTA CATARINA

A história de Santa Catarina, seu povoamento, a geração de empregos e de capital para o desenvolvimento sócio-econômico do Estado tem como base a atividade florestal.

O Estado era coberto, originalmente, por 85% da mais rica e densa floresta da América Latina. Na região do Contestado, a floresta da araucária possuía, em média, 516 m³ de madeira de alto valor econômico por hectare. Destes, 428 m³ eram de pinheiro e 60 m³ de imbuía. Esta floresta produzia mais que o dobro da floresta amazônica, cuja média é de 215 m³ de madeira por hectare [FRAN1999].

Durante 4,5 séculos, entre 1500 a 1950, a floresta constituiu-se no principal recurso natural mobilizado para a formação da base econômica do Estado. Em decorrência da exploração florestal surgiram estradas, ferrovias, portos e conseqüentemente foram fundados novos povoados, vilas, cidades, escolas, igrejas, indústrias, comércio, serviços e bancos que exigiram ampliação da distribuição da eletricidade e dos serviços de comunicação como, por exemplo, o telégrafo e a telefonia.

O grande impulso na produção madeireira no Estado, ocorreu com o início do funcionamento da LUMBER em três Barras, que se transformou na época na maior serraria da América Latina. Só de pinheiros serrou 15 milhões de pés nos seus 30 anos de funcionamento, entre o final da primeira e Segunda guerras mundiais. A atividade atraiu madeireiros do planalto gaúcho, onde as reservas de pinheiro estavam em declínio.

O auge da atividade madeireira ocorreu por volta da metade deste século. Nesta época, as toras de madeiras de cedros, angico e canjerana eram despachadas ou pelo Porto de Itajaí, que era o maior porto exportador de madeira serrada da América Latina, ou pelo Rio Uruguai em enormes balsas montadas e conduzidas por habilidosos e corajosos balseiros. Quando das enchentes no rio Uruguai, especialmente a de São de Miguel, aqueles que conseguiam sobreviver a passagem do Salto Grande, vendiam a sua produção para os mercados platinos (Uruguiana), que pagavam preços aviltantes valendo-se da condição de únicos compradores de uma mercadoria sem retorno. A grande oferta de madeira no mercado e a falta de planejamento de vendas provocaram problemas irremediáveis para o meio-ambiente e para o setor florestal catarinense. Como exemplos que devem ser discutidos e levados em consideração no futuro, citam-se o apodrecimento de toras nas margens do rio Uruguai por falta de mercado e de madeira serrada de araucária nas estações de trem por insuficiência de transporte ferroviário.

Por volta de 1950, 50% da arrecadação de tributos do Estado provinha da atividade madeireira.

O declínio da produção madeireira no Estado, a base de essências nativas, ocorreu com o fim da “fase do pinho” por volta de 1940. Os grupos que dependiam dessa atividade sentiram a necessidade de buscar soluções. A principal delas foi a adoção de uma política que tivesse como objetivo a proteção e reflorestamento desta valiosa espécie. Iniciou-se a “fase do pinus”.

Entre 1966 e 1986, nos 21 anos de vigência dos incentivos florestais do extinto IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal) foram plantados 382 mil hectares, basicamente de pinus e em menor escala de eucalipto.

Estas espécies florestais, por serem de rápido crescimento e alta produtividade, salvaram a economia madeireira do Estado do colapso, apesar de não terem sido realizados com tecnologia apropriada, pois visaram apenas fins energéticos e aplicação para a Indústria de papel e celulose.

Cita-se que dos atuais 420 mil hectares reflorestados, 350 mil, predominantemente de pinus para papel, celulose e madeira serrada são de propriedade de empresas do setor florestal. Os restantes 70 mil, formados por pequenos maciços, com predominância de eucalipto para fins energéticos pertencem aos produtores rurais.

Com as pressões internacionais para a preservação da mata nativa, surgiram novos nichos para a madeira de reflorestamento. Cresce o uso de pinus e eucalipto para fins nobres na

construção civil e mobiliário. Principalmente pelas suas características mecânicas e seus valores médios de densidade, em torno de 600 kg/m^3 , o eucalipto é o mais indicado para ambos os casos.

Entretanto, neste período, o binômio agropastoril ocupou o espaço da floresta após a sua derrubada. Seja por influência de outros estados da federação que adotaram com sucesso este modelo, seja pelo interesse de alguns grupos empresariais, ou ainda, pelo desconhecimento técnico dos órgãos governamentais.

A rápida diminuição da capacidade produtiva dos solos encareceu os custos da produção e comprometeu a competitividade dos produtos agrícolas. A política governamental optou pela utilização de subsídios agrícolas durante um longo período. Mas as mudanças provocadas pela globalização da economia colocaram em cheque o modelo agrícola catarinense, que se caracteriza, ainda, pela pequena propriedade e sua dependência do binômio agropastoril. Mudanças estas que já evidenciaram que apenas 30 % do solo catarinense é apto e competitivo para lavouras e pastagens.

O reordenamento da economia agrícola catarinense, adequando-se aos novos tempos de mercado aberto, tem na atividade florestal um forte aliado, já que pode ser exercida em praticamente todas as propriedades rurais. Desta forma, enormes áreas do Estado necessitam, urgentemente, serem reconvertidas para floresta, evitando com isto a perda de espaços produtivos, sem o que um grande número de propriedades rurais tornar-se-ão inviáveis.

Para que esta política seja implantada é necessário estar atento aos diferentes aspectos que envolvem o mercado florestal.

Entre os aspectos naturais cita-se o clima e o solo, pois eles definem quais as espécies que terão maior produtividade e desta forma, competitividade no mercado.

Com clima que favorece o desenvolvimento florestal, devido a abundante energia solar e umidade, Santa Catarina é um dos melhores nichos de alta produtividade florestal do mundo. Mesmo nos 70% dos solos intactos e não competitivos para a agricultura, a atividade florestal é competitiva. O atestado para as florestas catarinenses de alta produtividade, diversidade, qualidade e alto valor das espécies nativas foi conferido pela própria natureza. Ressalta-se que as espécies exóticas, conhecidas como de reflorestamento, também alcançaram bons resultados, principalmente quando comparados com os resultados dos países de origem. Portanto, resta apenas selecionar corretamente os diferentes tipos de mudas oriundas de viveiros orientados por

técnicas de melhoramento genético propícias para as diferentes regiões do Estado como, por exemplo, no litoral a plantação de eucalipto grandis e no interior de eucalipto dunnii.

Entre os aspectos ambientais e econômicos estão, a questão da oferta mundial de produtos florestais em função da política ambiental, as tendências do mercado, as tecnologias envolvidas nas diferentes fases do processo e as possíveis aplicações segundo os estudos de usinabilidade e características intrínsecas da madeira.

Sob esse aspecto estão os itens que realmente ajudarão a promover o crescimento da balança comercial e que fortalecerão os pequenos produtores. São importantes as pesquisas de mercado que verificam as tendências dos setores que agregam maior valor aos produtos florestais, principalmente no setor moveleiro. A seleção de máquinas, envolvendo estudos dos processos de fabricação, que tem objetivo principal a otimização de técnicas que elevam a qualidade superficial. Com isto promove-se o aumento da produtividade e da competitividade do setor atendendo as exigências internacionais no tocante as questões ambientais.

A nível mundial existem somente três institutos de excelência na área de tecnologia de usinagem de madeiras. O mais antigo tem apenas 50 anos de existência e situa-se na Alemanha. Isto justifica porque apesar da forte vocação florestal e tradição madeireira do Estado, tanto o produtor rural tanto os órgãos governamentais não desenvolveram a mentalidade florestal.

O advento dos serviços de extensão, pesquisa e fomento no Estado ocorreu no período de ascensão do binômio agropastoril. Serviços estes responsáveis pelo sucesso da agricultura catarinense nas últimas décadas. Por outro lado, os tênues e descontínuos esforços governamentais na área florestal, a nível de propriedade rural, mostraram-se insuficientes para viabilizar esta atividade a nível de propriedade rural.

Com a globalização da economia percebeu-se que as políticas que estão relacionadas com o meio-ambiente não são mais problemas regionais e, sim, parte integrante de diretrizes de políticas mundiais que devem ser discutidas e direcionadas a realidade local.

A.7. CONSUMO ATUAL DE MADEIRA

As plantações florestais com espécies de rápido crescimento, de manejo intensivo, em alguns países do hemisfério sul estão assumindo cada vez mais a importante missão de suprimento de madeira para fins industriais e para a geração de energia, comparativamente às

florestas naturais, já escassas e em geral ocupando áreas onde sua presença é muito mais importante para fins de conservação ambiental.

Em 1985, estas plantações florestais estavam estimadas em aproximadamente 39 milhões de hectares, correspondiam a apenas um pouco de 1 % da área total de florestas fechadas do globo. As projeções para o ano 2000 mostram que o total destas florestas deve chegar a cerca de 50 milhões de hectares. Esses valores correspondem a uma estimativa da participação de 14 % no consumo industrial de madeira em 1985, podendo equivar a cerca de 22% no ano 2000. Desde 1970, a área de novas plantações provavelmente atingiu a taxa de mais de um milhão de hectares por ano, mas essa taxa corresponde a apenas cerca de um décimo da taxa de desmatamento das florestas tropicais [EVANS, 1986].

A rentabilidade da utilização da floresta depende fundamentalmente da maximização do aproveitamento da árvore. A nível de Brasil, o rendimento médio das serrarias situa-se na faixa de 35 a 40%, gerando desperdício de 60 a 65% do material lenhoso. Apenas pequena parte deste material é utilizado, geralmente queimado para aquecimento de estufas de secagem da própria serraria.

O consumo crescente de madeira de Pinus e a falta de plantio para prover os crescimentos futuros implica que se tenha de promover a maximização do material lenhoso disponível. A necessidade de pesquisas é urgente para caracterizar o processo de remoção de cavaco para promover o desenvolvimento de equipamentos de fácil instalação, baixo custo de aquisição e de manutenção adequados às espécies florestais brasileiras. Desta forma, será possível diminuir as perdas nas serrarias e transformar, ainda, os resíduos em cavacos de alta qualidade destinados à fabricação de celulose, painéis, geração de energia, entre outras aplicações [Emp_RM1996].

No Brasil existe um total de 13.500 fábricas de móveis. Os 80% da madeira que se utiliza na indústria de móveis é de Pinus proveniente, principalmente, do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. As estimativas indicam que, com a redução de oferta de Pinus pela existência de um plano atual de reflorestamento pode abrir uma grande oportunidade para o MDF e Pinus radiata vindo do Chile, que poderiam satisfazer a demanda do recurso de madeira. Em outro plano, a indústria de madeira do compensado também está fragmentada. No Brasil existem 300 empresas e 40% delas produzem os 75% do total da produção, a qual alcança a 1 milhão m³/ano. Grande parte é exportada.

A.8. NECESSIDADE DA FORMAÇÃO DE COOPERATIVAS

Uma das políticas brasileiras é a implementação de ações, que induzam à reconversão de atividades atuais da agricultura familiar, em parceria com a FAO e o Sistema Cooperativo. Entre elas, procurar **incentivar o reflorestamento e a criação de associações de agricultores para o processamento de produtos de origem florestal**, bem como propiciar a formação de florestas nas propriedades rurais, destinando recursos para a antecipação da renda futura do empreendimento. O programa está associado ao desenvolvimento de parcerias com instituições públicas e privadas, principalmente as indústrias de base florestal e as cooperativas. Vital é o apoio a formação de redes de micro-empresas e empreendimentos associados a cooperativas para processamento, „marketing“ e distribuição destes produtos, bem como a implementação do „selo de qualidade“.

Para atingir esses objetivos, o governo brasileiro incentiva a expansão e o fortalecimento das cooperativas e associações de produtores, priorizando a participação nos financiamentos às atividades rurais e empreendimentos coletivos. Além disso, implementou recentemente um programa de abrangência direcionado à ampliação das exportações. O programa desenvolve-se em cinco diferentes linhas de atuação:

- Treinamento de pessoal dedicado à produção e à gestão de negócios com o exterior;
- Concessão de financiamentos através dos agentes financeiros, para a adequação de linhas de produção e geração de novos produtos que objetivam a conquista do mercado externo;
- Financiamento para a participação de empresas e/ou segmentos empresariais em feiras e exposições internacionais, bem como para a manutenção de escritórios e representações comerciais no exterior;
- Assessoria técnica e financeira para a formação de consórcios de Exportação, voltados às micro, pequenas e médias empresas; e,
- Simplificação dos processos administrativos que envolvam a exportação.

Em especial, para a área agro-silvicultural procura criar oportunidades de trabalho e renda pela agregação de valor aos produtos primários e através do agroturismo.

A.9. O PROBLEMA DA MADEIRA COMO MATERIAL PARA PRODUTOS INDUSTRIALIZADOS

A grande quantidade de madeira de excelente qualidade e de fácil acesso, disponível no Brasil até algumas décadas atrás, seguramente produziu seus efeitos. Uma política econômica especialmente voltada para a exportação, certamente não desprezaria a madeira como fonte de divisas. Devastaram-se rapidamente as florestas mais acessíveis. Atualmente, embora 85% da floresta amazônica esteja intocada, o acesso difícil e a distância de transporte oneram o custo da madeira a tal ponto que o seu uso se associa a imagem da riqueza e da ostentação. Portanto, o uso de madeiras “nobres” (de alto valor no mercado) é elitizado e não popular, prevalecendo em produtos de altíssimo padrão [BOHN, 1995].

Havendo interesse em destinar a madeira de excelente qualidade para a exportação, os incentivos para a pesquisa se destinavam para outros materiais e outras técnicas, que de fato muito evoluíram.

Culturalmente, principalmente na área de construção civil, disseminou-se a idéia de que a madeira é um material menos nobre e, portanto, deveria ser usada em edificações menos nobres: casa mais simples, casas provisórias, galpões, estábulos [SZÜCS, 1992]. Consequentemente, tais edificações destinavam-se as pessoas com nível de exigência menos apurado, o que contribuiu para mão-de-obra, as ferramentas e os próprios projetos não evoluíssem na mesma proporção dos demais materiais disponíveis e permitia o uso de madeira de pior qualidade. Desta forma, a madeira, como material de construção, ficou completamente desprestigiada no Brasil, e não houve investimento em reflorestamentos destinados à madeira para os segmentos da construção civil e, consequentemente, para do moveleiro. Paralelamente, havia a destruição e o desperdício da mata nativa. A destruição nas pequenas propriedades ocorria com o objetivo de limpar o terreno e substituir a floresta por culturas sazonais, não perenes, com retorno econômico maior a curto prazo, sem a preocupação a longo prazo. O desperdício ocorria sob a forma de queimadas, técnicas inadequadas de desdobro, falta de tratamento preservativo, uso e projetos inadequados. A valorização da madeira como material de construção e móvel promoveu reflorestamentos com espécies próprias para esta aplicação, garantindo a preservação das matas nativas, além de trazerem benefícios periféricos na preservação da fauna. Atualmente, destaca-se a utilização, no sul do Brasil, de 40% dos reflorestamentos de Pinus para a construção civil (tacos, forras, aberturas internas, lambris e divisórias) [SZÜCS1992] e de _____ % para o segmento

moveleiro []. Madeira esta plantada com objetivo exclusivo de utilização para a indústria de celulose (pasta de celulose). Políticas tem sido adotadas pelo setor público, como financiamento de conjuntos habitacionais de madeira e patrocínio de exposição de casas de madeira industrializadas, bem como concursos de Design para móveis com madeiras de eucalipto [FETEP-SBS, 2000]. No campo da tecnologia, embora aquém das necessidades, ocorrem estudos e pesquisas nos processos de tratamento preservativo, na concepção de projeto, nas técnicas de desdobro, no cultivo, nas formas de aglomeração e no desempenho da madeira como material tanto para a construção civil como para a indústria moveleira.

B. CARACTERIZAÇÃO, DESEMPENHO E PERSPECTIVAS DA INDÚSTRIA DE MÓVEIS

B.1. APRESENTAÇÃO

No final da década de cinquenta o interior do Estado de Santa Catarina vivia o apogeu do chamado "ciclo da madeira", que o projetaria, em termos macroeconômicos, como grande abastecedor de um mercado em expansão via industrialização e urbanização, e, politicamente, pela ocupação de expressivos espaços decisórios em nível nacional.

Somente a partir desta data, impulsionado pelas mudanças econômicas, iniciou-se a estruturação do modelo catarinense de regionalização do setor moveleiro.

Num contexto de globalização, é no lugar e na região que se manifesta o universal; numa realidade complexa e plural, se elege suas singularidades; numa situação de relativo empobrecimento e desequilíbrio sócio-econômico, não se pode perder de vista suas grandes potencialidades; e assim cria seu próprio jeito de ser uma indústria competitiva.

O próximo milênio será marcado por grandes transformações econômicas e sociais em todo o mundo, principalmente, pela introdução de novas tecnologias, pelos novos modelos organizacionais, pela relevância das questões ambientais e pela nova ordem nos mercados mundiais.

O setor moveleiro deve-se adaptar as novas tendências do mercado globalizado agora mais flexível e dinâmico e a Universidade deve ser o agente orientador para uma abordagem criativa na solução de problemas através de profissionais altamente qualificados, com boa capacidade de comunicação e, principalmente, com facilidade para trabalhar em equipe.

Um dos maiores desafios que se apresenta é o de contribuir para melhorar a inserção das empresas do setor moveleiro no mercado internacional, possibilitando-as a passar a disputar o mercado com base no desenvolvimento de modelos próprios, com diferenciação de produtos, deixando de ser meros tomadores de preços. Ou seja, agregar às atuais vantagens comparativas -

centradas nos custos da matéria-prima e na disponibilidade de mão-de-obra - vantagens dinâmicas ligadas ao aprendizado, à qualidade, ao desenho de produtos, etc., o que requer esforço especial em capacitação de pessoal, inovação e modernização tecnológica, oferta de matéria-prima alternativas respeitando as questões geradas não somente pelo processo de globalização, como, também, pelos mecanismos de proteção ambiental, incerteza na competição, escassez de capital, bem como a escassez de recursos e as desigualdades sociais.

B.2. ECONOMIA GLOBALIZADA

A necessidade do crescimento econômico, que intensifica as atividades humanas, está acelerando a destruição dos ecossistemas naturais e, conseqüentemente, a perda da biodiversidade no planeta. A destruição da natureza implica não apenas na interrupção da integridade de ciclos biológicos como também coloca em risco a própria sobrevivência humana, já que o homem depende da natureza para atender suas necessidades mais vitais.

A sabedoria de Mahatma Gandhi indicava que os modelos de desenvolvimento precisam mudar. Os estilos de vida das nações ricas e a economia mundial têm de ser reestruturados para levar em consideração o meio ambiente. Afinal, nenhuma decisão econômica pode ser feita sem afetar o meio ambiente. E nenhuma alteração ambiental pode ocorrer sem provocar impactos econômicos, por menores que sejam.

A proteção dos ecossistemas e a otimização de sua utilização requer soluções diversas que tenham em vista a conservação da natureza e também o uso sustentável dos recursos naturais. Mas tanto conservar quanto usar de forma sustentável não são tarefas fáceis. Além de envolverem fatores sociais, econômicos e políticos, ambas exigem a geração e a disseminação de conhecimento técnico e científico.

Durante um longo período produtos de madeira e de seus derivados tanto no segmento de consumo (artigos de cozinha, brinquedos, pequenos móveis, etc.) como no segmento de bens duráveis (móveis, janelas, portas, etc.) foram substituídos numa discreta competição por materiais como o plástico e o alumínio.

Entretanto, como resultado de pressões de organismos internacionais de proteção ao meio ambiente, vários países vêm desenvolvendo e implantando sistemas de verificação da qualidade ambiental dos produtos colocados no mercado, através dos “selos verdes”. A análise de um

produto para o recebimento do selo verde considera o levantamento global do impacto do mesmo em todo seu ciclo de vida, incluída a sua produção, distribuição, uso e descarte.

Portanto, as mudanças de comportamento quanto aos aspectos ambientais promovem uma reestruturação no mercado internacional de matéria-prima, conquistando a madeira oriunda de floresta plantada (silvicultura moderna, silvicultura intensiva) seu “nicho” no mercado de produtos florestais. Este tipo de madeira por ser renovável tem importância ascendente num mercado, onde além das pressões ecológicas, também a manutenção da competitividade e a necessidade de redução de custos são vitais.

B.3. VISÃO SISTÊMICA DA COMPETITIVIDADE

Competitividade de maneira sistêmica significa dizer que a economia está baseada em um suporte pluridimensional, multinível, onde a competência é fruto de diálogo e tomada de decisões conjuntas pelos grupos envolvidos.

A identificação dos elementos que constituem o ambiente e as condições que atuam neste cenário é necessária para identificar e compreender os canais através dos quais forças políticas e culturais se desenvolvem. Para tanto, deve-se ter uma visão ampla das forças que modelam o meio ambiente, reconhecendo sistematicamente que existem conexões e interdependências.

Os elementos vitais para a competitividade internacionalmente reconhecidos são a educação, o suporte a pesquisa, a cooperação internacional, a legislação fiscal e trabalhista coerentes com o mercado globalizado e a infra-estrutura necessária de transporte, de energia e comunicação. Possuir esses elementos significa elevar nas empresas à eficiência, à qualidade, à flexibilidade articuladas em sólidas redes colaborativas.

A competitividade pode ter diferentes enfoques. Para as lideranças políticas e econômicas significa o balanço positivo de comércio, para alguns economistas é o baixo custo unitário do trabalho ajustado às taxas de câmbio e, finalmente, para as empresas é a participação bem sucedida no mercado, seja local ou internacional.

Tecnicamente, a capacidade competitiva resultará da ação dos vários grupos (atores) envolvidos tanto no plano horizontal, quanto no vertical.

A competitividade pode ser melhor avaliada segundo os diferentes parâmetros de relevância competitiva em todos os níveis do sistema e a interação entre os níveis é que geram vantagens competitivas e que criam uma base auto-sustentável de competição.

A competitividade de uma indústria específica, bem como da própria economia de um país é reflexo de uma série de fatores que condicionam, direta ou indiretamente, o seu desempenho.

Em um nível mais básico - competitividade empresarial - encontram-se os fatores relacionados às empresas e os seus mercados imediatos.

A **competitividade empresarial** se refere à capacidade das empresas de sustentar os padrões mais elevados de eficiência vigentes no mundo, quanto à utilização de recursos e à qualidade de bens e serviços oferecidos. Uma empresa competitiva deve ser capaz de projetar, produzir e comercializar produtos com qualidade superior aos oferecidos pela concorrência, sejam eles oriundos exclusivamente de seus processos produtivos, ou fruto de parcerias com integrantes da economia.

As empresas devem ter, portanto, a capacidade de reagir aos desafios gerados pelo processo de globalização, pelo desenvolvimento tecnológico, incerteza na competição, excesso de ofertas, expectativas diferenciadas dos clientes, intervenção/parcerias com os governos, escassez de capital e, atualmente, as novas exigências relativas a proteção ambiental. Esses desafios devem servir de incentivo para as organizações aliarem alta qualidade com baixo custo e agirem com mais rapidez, reduzindo o ciclo de desenvolvimento dos produtos.

No plano intermediário - competitividade setorial -, encontram-se os fatores ligados ao setor e ao complexo industrial, ou seja, a interface com outros elos da economia.

A **competitividade setorial** reflete a capacidade de setores econômicos em gerar bases de criação e desenvolvimento de vantagens que sustentem uma posição competitiva internacional. Competitividade setorial é a medida na qual uma cadeia produtiva oferece, simultaneamente, potencial para crescimento e retorno sobre investimentos atrativos para as empresas que o compõem.

Em nível mais amplo - competitividade estrutural - encontram-se os fatores de natureza estrutural, econômicos, políticos e culturais.

A **competitividade estrutural** decorre da economia de um país em seu conjunto e descreve a capacidade dessa economia em incrementar ou sustentar sua participação no mercado

internacional de bens e serviços, com a elevação concomitante do nível de vida de sua população. Assim, um país para ser considerado estruturalmente competitivo deve ser aquele em que os componentes do ambiente nacional são estimuladores da eficiência empresarial.

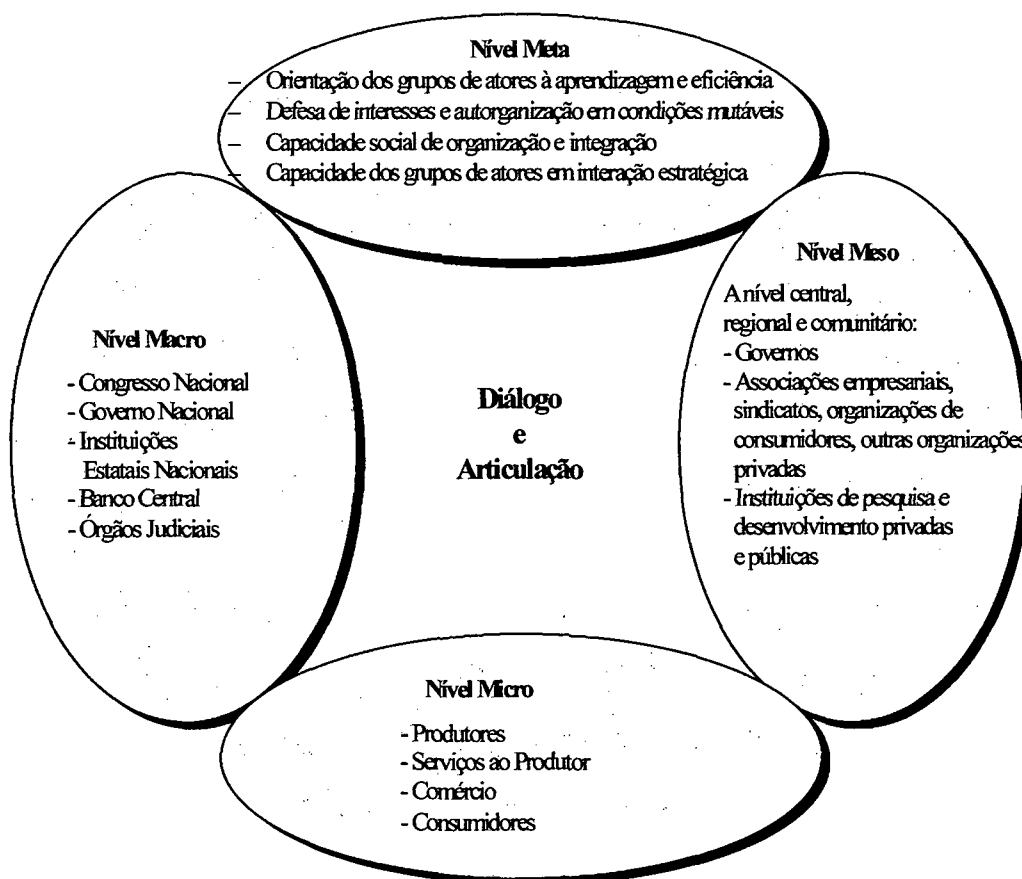


Figura 48 – Níveis determinantes da competitividade sistêmica

Dentro deste ambiente, o estabelecimento de uma **política industrial** tem como objetivo promover uma nova forma de competição através de empresas inovadoras, relações construtivas entre fornecedores e clientes, associações entre empresas e agências extra empresa, facilidades na melhoria contínua da produção, bem como uma orientação setorial estratégica.

A análise sistêmica para o estudo da capacidade competitiva de uma indústria ou das empresas de uma indústria em particular ou setor econômico é separada em níveis para melhor descrever a área de abrangência e suas características constitutivas.

ESSER et al. do Instituto Alemão de Desenvolvimento (IAD) estabelece que somente através da visão sistêmica da competitividade consegue-se de fato enfatizar os aspectos dirigidos ao esforço comum, articulados nos vários níveis do sistema.

Os quatro níveis determinantes da competitividade sistêmica envolvidos (o nível meta, o nível macro, o nível meso e o nível micro) podem ser identificados e entendidos na **Figura 48**.

B.4. MECANISMOS PARA O AUMENTO DA CAPACIDADE COMPETITIVA

As empresas que terão êxito no processo de globalização serão as que conseguirem desenvolver o maior número de dispositivos para tratar cada um dos fatores nas suas estratégias mercadológicas. O que vai determinar em grande parte a efetividade das estratégias escolhidas, e, conseqüentemente, a sustentabilidade do modelo competitivo são as ligações da empresa com a estrutura específica da indústria, bem como a qualidade das relações estabelecidas. As empresas, neste cenário, freqüentemente impossibilitadas de realizarem todas estas tarefas sozinhas, necessitam estabelecer relações de cooperação com unidades de suporte ao ensino e a pesquisa, fornecedores, clientes, concorrentes ou outros agentes externos, para serem competitivas, nos seus respectivos setores.

Em linhas gerais, constata-se que num mundo globalizado coexistem regimes econômicos, sociais, políticos e sobretudo, culturais diversos e até mesmo antagônicos. A equalização destes fatores pelas “forças dominantes da economia mundial” está longe de ser efetiva, ou se quer, ser tentada. Não se deve esperar inocentemente que existirá espaço igualmente distribuído para todos os cidadãos da aldeia global.

Cabe aos Estados (países em desenvolvimento, não desenvolvidos, economias periféricas, etc.), a nível macro, desenvolverem ações adequadas à esta nova ordem mundial, dispondo de mecanismos que promovam o fortalecimento e a estabilidade das economias internas, proporcionando o surgimento de um modelo de competitividade alinhado com estas novas tendências, baseado na cooperação entre os segmentos das cadeias produtivas dos vários setores da economia, de modo a promover a sustentabilidade frente aos desafios que estão sendo desenhados.

Á nível micro, cada empresa precisa achar seu lugar nessa economia global. Mesmo que os negócios estejam em um único país, estarão competindo com empresas de todo o mundo

desenvolvido. Esse é o caminho. É preciso decidir entre atuar sozinho ou partir para alianças, “joint ventures”, licenciamento, sociedades, etc..

Em países como o Brasil, onde os problemas sociais, financeiros, fiscais e políticos possuem uma dimensão maior, basear os modelos de competitividade nas vantagens comparativas, como é o caso da disponibilidade de matéria-prima e mão-de-obra barata, não é sustentável perante aos novos padrões de concorrência. A mão-de-obra barata está quase sempre acompanhada de baixa produtividade e a falta de capacitação, e a *disponibilidade* de matéria-prima sofre restrições de uso por organizações ambientais internacionais.

Um país *em desenvolvimento* deve usar seus recursos como ponto de partida. O problema é uma economia basear-se apenas nisso por muito tempo. Quem depende demais de recursos naturais e salários baixos não vai desenvolver outras habilidades e tecnologias para competir com produtos mais avançados num mercado global.

A preocupação quanto à geração e disseminação de conhecimentos e práticas que promovam a conservação da natureza, o uso sustentável dos recursos naturais e o melhor aproveitamento dos produtos florestais levou várias organizações, empresas e universidades a juntarem esforços em torno de pesquisas que, através da formação e do treinamento de recursos humanos, procura atender a algumas necessidades de treinamento com base na demanda existente e levando em consideração áreas de conhecimento pouco desenvolvidas.

A utilização da matéria-prima madeira para móveis, componentes e outros produtos de maior valor agregado são considerados produtos ambientalmente corretos nos aspectos relativos a transformação, distribuição e descarte. No entanto, os aspectos de obtenção de matéria-prima sofrem pressões internacionais exigindo a certificação de origem, seja oriunda ou de florestas plantadas ou de floresta tropical manejadas de forma sustentável.

As unidades de suporte ao Ensino e a Pesquisa, as associações de classe e as próprias empresas, juntamente com o MRE (Ministério das Relações Exteriores) e MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio), poderiam desenvolver ações de implementação e acompanhamento de inúmeros projetos de desenvolvimento e de exportação de produtos florestais ambientalmente corretos. Poderiam, também, organizar um sistema de acompanhamento permanente e de troca de informações sobre as oportunidades de exportação. Além disso, formar consórcios para o atendimento de muitos pedidos de exportação e cobrir os custos relativos ao desenvolvimento de novos produtos e/ou às inspeções necessárias sobre o impacto do produto em todo o seu ciclo de vida para a obtenção da “certificação ambiental”.

Finalmente, faz-se necessária a elaboração de um "Programa de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial" para o setor moveleiro, como forma de elevar a capacitação técnica das empresas, e promover uma maior cooperação entre as mesmas na busca de um modelo de organização industrial menos verticalizado e competitivo no mercado globalizado.

Para curar as empresas das suas seqüelas do passado turbulento e confuso da época inflacionaria e adaptá-las à nova realidade da estabilização econômica pode-se resumir que os mecanismos para elevar a competitividade contem cinco palavras-chaves muito conhecidas dos executivos: planejamento, controle, direção, organização e criatividade através do investimento em profissionais altamente qualificados e integrados as necessidades do mercado internacional.

O principal mecanismo para elevar a competitividade das empresas, principalmente do setor moveleiro, é sempre ainda a capacidade de preparar e construir talentos para o desenvolvimento de novos produtos, novas tecnologias de processo e de novas máquinas-ferramentas e a capacidade de implementar e gerenciar novos métodos organizacionais. Para tanto, a necessidade de se investir no preparo do talento humano, que deve sempre estar em primeiro lugar. "Para vencer no regime de competitividade, torna-se vital obter a somatória de talentos, que irá gerar uma empresa saudável que, por sua vez, tornará a sociedade e o País mais competente".

B.5. O MERCADO INTERNACIONAL DE MÓVEIS

O comércio mundial de móveis, ainda concentrado nos países desenvolvidos, segue a tendência geral de abertura e globalização econômica, e vem crescendo rapidamente, especialmente nos últimos anos. O total de importações mundiais de móveis aproxima-se dos US\$ 50 bilhões. Os Estados Unidos destacam-se como o maior importador líquido de móveis, absorvendo cerca de 20% do total comercializado, seguido pela Alemanha, França, Japão, Canadá, Inglaterra, Suíça, Bélgica e Holanda. Juntos, estes nove países responderam por 70% das importações mundiais de móveis em 1995 (**tabela 5**).

Do lado das exportações destacam-se a Itália e a Alemanha que, juntas, são responsáveis por mais de 30% do valor total das exportações mundiais, seguidas por Taiwan, Canadá, Bélgica, Dinamarca e França. A Itália, com aproximadamente 19% das exportações totais, é destacadamente o maior exportador mundial de móveis, seguida pela Alemanha, Taiwan, Dinamarca, Canadá e Suécia.

Embora tenham aumentado suas fatias, ainda é pequena a participação dos países em desenvolvimento no comércio internacional de móveis. Dados recentes indicam que as exportações dos países em desenvolvimento giram em torno de 15% do volume mundial, sendo que Taiwan sozinho responde por mais da metade dessa fatia (FERRAZ, 1995).

Tabela 5: Comércio internacional de móveis: valor das importações segundo principais países importadores

País	(Em US\$ milhões)							
	1988	%	1993	%	1994	%	1995	%
Estados Unidos	5202,8	22,7	6905	20,5	8290	20,7	9128	20,4
Alemanha	2797,5	12,2	5007	14,9	5715	14,3	6584	14,7
França	2663,4	11,6	2474	7,3	2738	6,8	3206	7,2
Japão	739,3	3,2	1933	5,7	2677	6,7	3155	7,1
Canadá	582,9	2,5	1740	5,2	1912	4,8	1985	4,4
Reino Unido	1773,4	7,7	1614	4,8	1746	4,4	1915	4,3
Suiça	1172,4	5,1	1386	4,1	1544	3,9	1857	4,2
Bélgica	1008,8	4,4	1340	4,0	1546	3,9	1776	4,0
Holanda	1239,8	5,4	1458	4,3	1611	4,0	1738	3,9
Áustria	738,1	3,2	1100	3,3	1245	3,1	1455	3,3
Federação Russa	nd	-	451	1,3	997	2,5	1157	2,6
Demais Países	5010,9	21,9	8299,3	24,6	9965,8	24,9	10788,8	24,1
Total	22929,3	100,0	33707,3	100,0	39986,8	100,0	44744,8	100,0

Fonte: Abimóvel – Associação Brasileira da Indústria do Móvel. (1997)

Nos últimos anos ampliaram-se as exportações de alguns países em desenvolvimento, destacando-se a performance de Taiwan como crescente fornecedor dos EUA e países da União Européia. Outros países asiáticos, como Filipinas, Coreia, Tailândia e Hong Kong, embora em escalada bem menor, também têm intensificado suas vendas de móveis para os países desenvolvidos.

Os móveis de madeira constituem o principal segmento do comércio internacional de móveis. A Itália e a Alemanha detêm a hegemonia em diversos segmentos das exportações de móveis chegando a controlar 50% das exportações mundiais nos segmentos madeira e metal.

Na Itália, as maiores empresas se dedicam à montagem e acabamento de móveis, cabendo a um grande número de pequenas e micro-empresas subcontratadas a fabricação de peças e componentes. As empresas são especializadas na fabricação de determinado tipo de móvel ou de componente, utilizando máquinas de última geração. São mais de 30.000 empresas, quase todas com menos de 500 empregados.

Na Alemanha, o padrão de organização da indústria moveleira é um pouco mais concentrado, envolvendo um número menor de empresas que operam de maneira menos desverticalizada.

O recente sucesso e projeção de Taiwan no mercado internacional de móveis é atribuído, em grande parte, ao reduzido grau de verticalização da produção, onde pequenas e médias empresas se especializam em determinados modelos, utilizando uma extensa rede de empresas subcontratadas para produção de partes e componentes.

O padrão de desenvolvimento tecnológico do setor a nível mundial é determinado pela indústria de máquinas e equipamentos. Assim, nos países onde o acesso e o intercâmbio entre o setor moveleiro e o de máquinas e equipamentos são facilitados existe uma tendência natural a um maior desenvolvimento.

A mudança tecnológica mais significativa ocorrida recentemente foi a substituição de máquinas eletromecânicas por máquinas com dispositivos microeletrônicos de controle, as máquinas CNCs. Estas novas máquinas permitiram maior eficiência no processo produtivo, melhoria na qualidade dos produtos e maior flexibilidade na produção.

As mudanças no processo de produção na indústria costumam ser do tipo incrementais enquanto as inovações tecnológicas em produtos geralmente ocorrem através de mudanças no *Design*, uso de novos materiais e conseqüentemente novas máquinas-ferramentas e tecnologias.

B.6. PADRÃO DE COMPETITIVIDADE INTERNACIONAL

A indústria moveleira mundial caracteriza-se por ser altamente absorvedora de mão-de-obra, fragmentada e dominada por pequenas, médias e micro-empresas. O padrão de organização industrial é a especialização das empresas para atuação em poucas etapas do processo de produção, com reduzido grau de verticalização produtiva.

O padrão competitivo internacional da indústria de móveis é caracterizado por alguns elementos que, quando presentes, asseguram capacidade de sustentação da competitividade, dentre eles podemos destacar os seguintes:

- Modernização tecnológica e eficiência nos processos produtivos;

- Elevado conteúdo tecnológico e qualidade nos produtos com flexibilidade de arranjos, facilidade de montagem e *Design* diferenciado;
- Organização industrial desverticalizada com especialização flexível das empresas em poucas etapas da cadeia produtiva e atuação em redes colaborativas de subcontratação; e,
- Estratégias comerciais agressivas.

Como referencial na determinação do padrão internacional de competitividade na indústria moveleira, países como Itália e Alemanha devem, obrigatoriamente, ser citados. Estes dois países, cada um com suas características específicas, tornaram-se um ponto de referência para o setor.

Na Itália, país líder na produção de móveis, uma extensa rede de médias, pequenas e micro-empresas com elevado grau de interdependência atuam em etapas específicas da cadeia de produção de móveis com intensas relações entre empresas baseadas na colaboração e confiança mútuas. O recente sucesso de Taiwan no mercado internacional de móveis é atribuído à sua forma de organização industrial baseada na especialização e no reduzido grau de verticalização, onde, as pequenas e micro-empresas atuam como subcontratadas para fabricação de peças e componentes e as empresas maiores se ocupam da montagem, acabamento e comercialização.

A integração entre a indústria de móveis e a indústria de máquinas-ferramentas na Itália e Alemanha, países líderes no comércio mundial de móveis, permite uma permanente atualização da base técnica da indústria moveleira a custos menores que em outros países.

O acesso às matérias primas é uma condição importante para a competitividade internacional na indústria de móveis de qualquer país. É fato que as exportações de madeira bruta, de espécies nobres, por parte dos países em desenvolvimento, acabam transferindo esta vantagem comparativa aos países desenvolvidos que utilizam este tipo de matéria-prima para produção de móveis altamente diferenciados em *Design*.

As facilidades de importação de madeiras nobres nos países desenvolvidos acaba por consolidar suas vantagens competitivas com base na tecnologia, na organização produtiva e na diferenciação dos produtos. Por perceberem como uma questão estratégica da maior importância, alguns países como a Indonésia e Filipinas proibiram a exportação de madeira bruta.

Dada a importância da madeira para a fabricação de móveis, o fato do Brasil possuir condições climáticas excepcionais, o que lhe confere vantagens de custos importantes na

produção de madeira, especialmente de Pinus, pode tornar o país um forte concorrente no plano internacional se esta vantagem comparativa for transformada em efetiva vantagem competitiva. Por ser um importante exportador de madeira bruta, o Brasil, além de renunciar à vantagem de dispor de matéria-prima abundante e barata, transfere a possibilidade de agregar valor ao produto e limita as condições de desenvolvimento da indústria nacional.

B.7. A INDÚSTRIA MOVELEIRA BRASILEIRA

O Brasil possui condições climáticas excepcionais, o que lhe confere vantagens de custos importantes na produção de madeira de floresta plantada, o que pode tornar o país um forte concorrente no plano internacional, se esta vantagem comparativa, for transformada em efetiva vantagem competitiva.

O Setor Florestal brasileiro é extremamente significativo para o Brasil. Dos 7.705.200 empregados da indústria de transformação, as serrarias e fabricação de artigos de madeira e mobiliário empregaram 854.200 pessoas. É o segundo maior setor responsável pela ocupação de trabalhadores após o setor de fabricação de artigos do vestuário e acessórios [Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de Contas Nacionais, 1997].

Um dos mais importantes segmentos deste setor é a indústria moveleira, que emprega cerca de 300.000 trabalhadores diretamente na produção, gerando 1.500.000 empregos entre diretos, indiretos e correlatos [MDIC, 1997].

A indústria Brasileira de móveis é composta por aproximadamente 13.500 empresas, produz cerca de 6,6 bilhões de dólares/ano e exporta mais de 400 milhões de dólares por ano. De modo semelhante ao que ocorre em outros países predominam as micro, pequenas e médias empresas. A grande maioria das empresas (74%) possui menos de 15 empregados, 22% são pequenas empresas (16 a 150 empregados) e apenas 4% empregam mais de 150 pessoas. Cerca de 300 empresas com mais de 100 empregados respondem por mais da metade do valor da produção.

Os móveis de madeira representam cerca de 70% do mercado brasileiro de móveis destinando-se, na sua maioria, ao uso residencial.

O segmento de móveis sob medida é extremamente disperso no território nacional e envolve um grande número de micro e pequenas marcenarias que atendem a pedidos individuais,

trabalhando com uma pequena escala de produção, geralmente com equipamentos tecnologicamente mais atrasados, reflexo de uma organização produtiva baseada no conhecimento empírico adquirido na base do *learning by doing*.

A produção brasileira de móveis de madeira retilíneos concentra-se em empresas de médio e pequeno porte. Como mostram Rangel (1993) e Coutinho e Ferraz (1994) em um Estudo sobre a Competitividade da Indústria Brasileira, este segmento é o menos defasado no processo produtivo (linhas de produção sequenciais e limpas, com fluxo contínuo e sem estoques intermediários, mas com elevada verticalização).

No segmento de móveis torneados de madeira convivem micro, pequenas e médias empresas com produção em série. A grande variedade de produtos, as diferentes características locacionais e a disparidade no desenvolvimento tecnológico deste segmento conduz as empresas a operarem com variados níveis de produtividade e eficiência, gerando distintas capacidades competitivas.

Uma das características da organização industrial do setor, comum a todos os segmentos desta indústria, é a grande verticalização do processo produtivo. Numa mesma unidade fabril convivem inúmeros processos tecnológicos gerando uma gama variada de produtos, refletindo a necessidade de atuarem em várias etapas da cadeia como forma de compensação da baixa rentabilidade, desperdícios nos processos de produção, obsolescência tecnológica e gerencial.

A indústria moveleira apresenta significativa distinção na forma, características e tamanho, reflexo das diferenças regionais existentes. Ao longo da evolução desta indústria ocorreu, em algumas regiões, um forte movimento de aglomeração de empresas em sistemas territoriais compactos envolvendo poucos municípios e consolidando alguns pólos industriais especializados na produção de móveis, como por exemplo Bento Gonçalves (RS), Arapongas (PR), Mirassol e Votuporanga (SP), Ubá (MG), Linhares (ES) e São Bento do Sul/Rio Negrinho(SC).

B.8. A INDÚSTRIA CATARINENSE DE MÓVEIS E O PÓLO MOVELEIRO DE SÃO BENTO DO SUL

O segmento de fabricação de móveis em Santa Catarina sempre apresentou importância significativa para o desenvolvimento econômico e social do Estado, econômico pela expressiva participação no PIB estadual, e social, pela utilização de mão-de-obra intensiva.

Em Santa Catarina, a indústria de móveis ocupa o 6º lugar no ranking setorial das exportações. Nos últimos anos as exportações catarinenses de móveis apresentaram um extraordinário desempenho atingindo um montante 7 vezes maior em 1996 comparado a 1990. Somente na região de São Bento do Sul, Rio Negrinho e Campo Alegre - o grande pólo moveleiro catarinense - a produção de móveis emprega aproximadamente 12.000 pessoas sendo uma das mais importantes fontes de geração de renda do país.

A indústria moveleira catarinense tem, tradicionalmente, se destacado nas exportações brasileiras do setor respondendo por mais da metade do volume exportado nos últimos anos. Apenas os três municípios que compõem o pólo moveleiro de São Bento do Sul contribuíram com cerca de 40% de todo o valor exportado pelo Brasil e por 70% do correspondente a Santa Catarina.

São Bento do Sul é hoje um dos pólos de aglomeração industrial de PMEs (Pequenas e Médias Empresas) mais dinâmicos do país, do ponto de vista de sua capacidade de internacionalização. O elevado crescimento das exportações de móveis principalmente a partir de 1990 indica uma performance competitiva singular dentro do contexto setorial.

Algumas condições iniciais foram fundamentais para o surgimento do pólo moveleiro na região de São Bento do Sul. A existência de matéria-prima abundante na região, a presença de imigrantes artesões marceneiros, a presença de um comércio intenso de madeira e erva mate e a acumulação de renda proveniente da exploração destes dois produtos, formaram as condições básicas para o desenvolvimento da indústria regional.

Destacam-se, ainda, na produção de móveis em Santa Catarina os municípios de Mafra, Guaramirim, Jaraguá do Sul e Urussanga. Neste último, está localizada uma das principais empresas exportadoras de móveis do Brasil. Recentemente em alguns municípios da região de Chapecó vem se desenvolvendo uma emergente indústria localizada de móveis com cerca de 200 empresas, a maioria de pequeno porte, com algumas de médio porte.

Apesar da performance exemplar dos últimos anos, estudos apontam a indústria moveleira brasileira como um dos setores que apresentam deficiências competitivas em relação ao padrão de competitividade e de concorrência internacional (Rangel, 1993; Coutinho e Ferraz, 1994, BRDE, 1997).

Ao longo de toda a cadeia produtiva existem ações que devem ser desenvolvidas, para colaborar em maior ou menor grau com o incremento da competitividade. Entidades de suporte pretendem colaborar de forma decisiva com algumas ações específicas que se fazem necessárias visando em primeiro lugar a manutenção e posteriormente a melhoria do desempenho desse importante segmento industrial.

A modernização de máquinas e equipamentos é um pré-requisito fundamental para a elevação da competitividade do setor moveleiro. Este processo pode ser incentivado, a curto prazo, via a diminuição das tarifas de importação de máquinas e equipamentos, bem como pela disponibilidade de linhas de crédito específicas, de modo a possibilitar aos empresários acesso a equipamentos de padrão mundial. A longo prazo, ações mais consistentes e duradouras devem ser desenvolvidas, mediante a aproximação da indústria de móveis e a de máquinas e equipamentos, no sentido de desenvolvimento de tecnologia específica para as necessidades do setor. Isto só será conseguido mediante a atuação das entidades de suporte, associações empresariais e as várias esferas do governo no sentido de criar uma atmosfera favorável à confluência de esforços.

Uma intensificação nos programas de qualidade se faz necessária, já que o ritmo atual de implantação de qualidade e competitividade nas empresas é lento, até mesmo incipiente, frente as necessidades identificadas no setor.

Desta forma, a formação e a qualificação da mão-de-obra devem passar por um esforço conjunto onde necessariamente devem estar envolvidos: o governo como fomentador do desenvolvimento, as entidades de suporte (instituição de ensino e pesquisa) via ações específicas através das suas instituições formando profissionais criativos e integrados ao ambiente industrial, as associações de classe na formulação das diretrizes para tais programas e os empresários através da absorção do contingente formado e treinado.

O objetivo global é promover o desenvolvimento sócio-econômico deste importante setor da economia estadual, através de financiamentos, de incentivos fiscais do investimento em modernização técnica, em requalificação da mão-de-obra e a formação de profissionais altamente qualificados e orientados as necessidades do mercado de trabalho.

O atual padrão de concorrência internacional mostra que as empresas brasileiras poderiam melhorar sua capacidade competitiva trilhando o caminho da modernização tecnológica do parque fabril, da especialização flexível das empresas e do maior entrelaçamento entre empresas e entre os diferentes grupos que compõem o sistema.

Estas possibilidades de aumento de participação brasileira no comércio internacional de móveis nos próximos anos, vão depender da agressividade comercial de suas empresas, do pragmatismo da política de comércio exterior e do grau de ajuste da organização industrial do setor ao padrão internacional.

Afinal, o que se busca é a afirmação, no plano internacional, de uma indústria exportadora de móveis, não só pelo fator preço mas também pelo emprego de novas tecnologias e qualidade superior de produção (textura superficial dos móveis) e pelo Design diferenciado e novos madeiras somente alcançados com profissionais bem qualificados e integrados ao mercado globalizado.

O desenvolvimento e consolidação da “marca” *Brasil* no mercado internacional de móveis depende do desempenho sinérgico dos grupos envolvidos como Governo, empresários e unidades de suporte, com a finalidade de alcançar a competitividade sob a visão sistêmica em todos os seus níveis: estrutural, setorial e empresarial.